

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**UTILIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ESTEREOLITOGRAFIA E
MICROFUSÃO PARA APLICAÇÕES EM PROTOTIPAGEM RÁPIDA E
FERRAMENTAL RÁPIDO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

DAURI ALBERTO GRELLMANN

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2001.

**UTILIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ESTEREOLITOGRAFIA E
MICROFUSÃO PARA APLICAÇÕES EM PROTOTIPAGEM RÁPIDA E
FERRAMENTAL RÁPIDO**

DAURI ALBERTO GRELLMANN

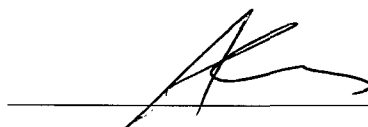
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

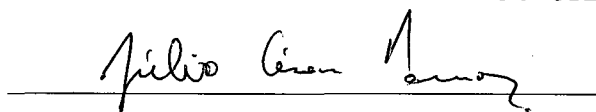
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Áureo Campos Ferreira, Ph.D.
ORIENTADOR



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.
CO-ORIENTADOR

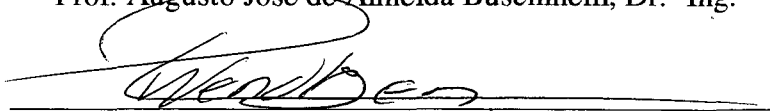


Prof. Júlio Cesar Passos, Dr.
COORDENADOR DO CURSO

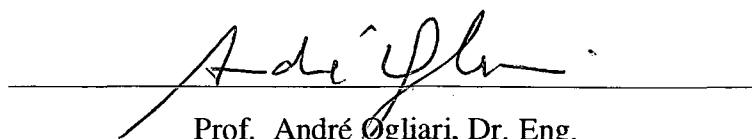
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr. -Ing.



Prof. Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr. -Ing.



Prof. André Ogliari, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

À Deus que esteve sempre presente na minha vida

À minha família que me incentivou em todos os momentos.

À minha noiva Viviane, pelo apoio, compreensão e carinho.

Aos Professores Carlos Ahrens e Áureo C. Ferreira pela orientação neste trabalho.

Aos colegas e amigos do CIMJECT pela amizade, apoio e sugestões que enriqueceram este trabalho

Aos colegas de curso pela amizade e trocas de experiências.

À UFSC onde me formei e adquiri conhecimentos .

Ao CNPq pelo investimento na minha formação.

À equipe do PAT/PRONEX pelo apoio financeiro desta pesquisa.

À empresa PRECICAST – Fundação de Precisão e seus funcionários pelo apoio técnico e infraestrutura oferecida.

À Escola Técnica Tupi pela doação do porta moldes utilizado.

E a todos que me ajudaram de alguma forma na realização deste trabalho.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que nunca mediram esforços para que este sonho se tornasse realidade.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
SIMBOLOGIA	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. PROTOTIPAGEM RÁPIDA : PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES NA MANUFATURA	6
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
2.2 FUNDAMENTOS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS	9
2.3 ETAPAS GERAIS DOS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA	11
2.3.1 Modelamento CAD 3D	12
2.3.2 Tradução e Transmissão de Dados	12
2.3.3 Verificação	13
2.3.4 Orientação	14
2.3.5 Geração de Suportes	15
2.3.6 Preparação para Construção	16
2.3.7 Construção	16
2.3.8 Pós Processamento	17
2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA	17
2.4.1 Sistemas Baseados em Líquidos	18
2.4.2 Sistemas Baseados em Sólidos	18
2.4.3 Sistemas Baseados em Pós	19
2.5 PRINCÍPIOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA	19
2.5.1 Polimerização de Resina Líquida por Raio Laser	20
2.5.2 Polimerização de Resina Líquida Utilizando Máscara/Lâmpada UV	21
2.5.3 Fabricação por Corte e Colagem de Lâminas ou Folhas	22
2.5.4 Fabricação por Fusão e Solidificação de Fios ou Grânulos	24

2.5.5	<i>Sinterização de Partículas por Raio Laser</i>	25
2.5.6	<i>Uso de Colas ou Ligantes para Juntar Partículas</i>	27
2.6	APLICAÇÕES DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA MANUFATURA	29
2.6.1	<i>Aplicações no Projeto</i>	29
2.6.2	<i>Aplicações em Engenharia, Análise e Planejamento</i>	30
2.6.3	<i>Aplicações na Manufatura e Fabricação de ferramentas</i>	31
2.7	APLICAÇÕES EM FERRAMENTAL RÁPIDO	32
2.7.1	<i>Classificação das Técnicas de Ferramental Rápido</i>	33
2.7.2	<i>Método de fabricação do Ferramental QuickCast™</i>	35
3.	PADRÕES DE ESTEREOLITOGRAFIA PARA MICROFUSÃO	37
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	37
3.2	O PROCESSO TRADICIONAL DE MICROFUSÃO	38
3.2.1	<i>Etapas do Processo Tradicional de Microfusão</i>	39
3.2.1.1	<i>Injeção dos Padrões de Cera</i>	39
3.2.1.2	<i>Montagem dos Padrões na Árvore de Cera</i>	39
3.2.1.3	<i>Composição da Casca Cerâmica</i>	40
3.2.1.4	<i>Remoção dos Canais e Padrões de Cera em Autoclave</i>	40
3.2.1.5	<i>Sinterização da Casca Cerâmica</i>	41
3.2.1.6	<i>Vazamento do Metal Líquido</i>	42
3.2.1.7	<i>Quebra do Molde Cerâmico</i>	42
3.2.1.8	<i>Acabamento das Peças Fundidas</i>	43
3.3	DESENVOLVIMENTO DOS PADRÕES DE ESTEREOLITOGRAFIA PARA MICROFUSÃO	43
3.3.1	<i>Estilos de Construção na Estereolitografia</i>	44
3.3.1.1	<i>Estilo de Construção STAR-WEAVE™ ou FAST™</i>	44
3.3.1.1	<i>Estilo de Construção ACES™ ou EXACT™</i>	45
3.3.1.1	<i>Estilo de Construção TOOLING™</i>	45
3.3.1.4	<i>Estilo de Construção QUICKCAST™</i>	45
3.3.2	<i>Características Construtivas dos Padrões QuickCast™</i>	46
3.3.2.1	<i>Topologia da Estrutura Interna dos Padrões</i>	47
3.3.2.2	<i>Drenagem da Resina Líquida do Interior dos Padrões</i>	48
3.3.2.3	<i>Características da resina Utilizada para Construir os Padrões</i>	50
3.3.3	<i>Fundamentos da Expansão Térmica dos Padrões de SL</i>	51

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	56
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	56
4.2 DEFINIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS	57
4.2.1 <i>Primeira Fase: Fabricação de Protótipos Metálicos Funcionais</i>	57
4.2.1.1 Experimento I: Testes Iniciais de Fundição	57
4.2.1.2 Experimento II: Caracterização da Resina SL5170	61
4.2.1.3 Experimento III: Estudo dos Parâmetros de Construção dos Padrões Quickcast™ para Microfusão	63
4.2.2 <i>Segunda Fase: Fabricação de Insetos Para Moldes de Injeção de Plásticos</i>	67
4.2.2.1 Geometrias Utilizadas nos Estudos de Casos em Ferramental Rápido	67
4.2.2.2 Definição dos Estudos de Casos em Ferramental Rápido	68
4.2.2.3 Projeto do Ferramental QuickCast	69
4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ADOTADOS	75
4.3.1 <i>Fabricação dos Padrões QuickCast™</i>	75
4.3.1.1 Modelamento CAD 3D	75
4.3.1.2 Conversão dos Dados CAD para o Formato .STL	76
4.3.1.3 Orientação das Peças para Construção	77
4.3.1.4 Geração de Suportes para Construção das Peças	77
4.3.1.5 Seleção dos Parâmetros de Construção dos Padrões QC	78
4.3.1.6 Fabricação dos Padrões de Fundição na máquina de SL	79
4.3.1.7 Drenagem e Limpeza dos Padrões QuickCast™	79
4.3.1.8 Pós-Cura dos Padrões QuickCast™	80
4.3.1.9 Medições e Pesagem dos Padrões QuickCast™	81
4.3.1.10 Preparação dos Padrões para o Processo de Microfusão	81
4.3.2 <i>Fabricação por Microfusão Utilizando Padrões QuickCast™</i>	81
4.3.2.1 Montagem dos Padrões QuickCast™ nas Árvores de Cera	81
4.3.2.2 Construção do Molde Cerâmico	82
4.3.2.3 Deceramento em Autoclave	84
4.3.2.4 Queima dos Padrões e Calcinação do Molde Cerâmico	84
4.3.2.5 Resfriamento das Peças Fundidas e Quebra da Casca Cerâmica	85
4.3.2.6 Acabamento Superficial das Peças Fundidas	86

5. RESULTADOS OBTIDOS	87
5.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	87
5.1.1 <i>Crterios para Avaliao dos Resultados da Primeira Fase de Experimentos</i>	87
5.1.2 <i>Crterios para Avaliao dos Resultados da Segunda Fase de Experimentos</i>	88
5.1.2.1 Avaliao por Crterios Tcnicos	89
5.1.2.2 Avaliao por Crterios Econmicos e de Tempo	90
5.2 RESULTADOS OBTIDOS	90
5.2.1 <i>Resultados Obtidos na Primeira Fase de Experimentos</i>	90
5.2.1.1 Resultados Alcanados no Experimento I	90
5.2.1.2 Resultados Alcanados no Experimento II	93
5.2.1.3 Resultados Alcanados no Experimento III	97
5.2.2 <i>Resultados Obtidos na Segunda Fase de Experimentos</i>	98
5.2.2.1 Resultados Alcanados no Estudo de Caso I	98
5.2.2.2 Resultados Alcanados no Estudo de Caso II	100
6. ANLISE GERAL DOS RESULTADOS E CONCLUSOES	108
6.1 ANLISE DOS RESULTADOS: FABRICAO DE PROTOTIPOS METALICOS FUNCIONAIS	108
6.1.1 <i>Principais Problemas Encontrados Durante os Experimentos</i>	108
6.1.1.1 Trincas ou Quebras do Molde Ceramico	108
6.1.1.2 Drenagem Incompleta dos Padres	109
6.1.1.3 Porosidade na Superfcie do Fundido	109
6.1.1.4 Incluses de Material Ceramico nas Peas Fundidas	109
6.1.1.5 ondulaes na Superfcie dos Padres	110
6.1.2 <i>Anlise da Quebra das Cascas Ceramicas</i>	112
6.1.2.1 Anlise dos Fatores que Influenciam na Quebra da Casca Ceramica	113
6.2 ANLISE DOS RESULTADOS: FERRAMENTAL RPIDO	118
6.2.1 <i>A Influencia da Etapa de Deceramento em Autoclave</i>	118
6.2.2 <i>Avaliao da Tcnica QuickCast Tooling sob Aspectos Tcnicos</i>	120
6.2.2.1 Controle Dimensional	120

6.2.3	<i>Avaliação da Técnica QuickCast Tooling sob Aspectos de Custos e Tempo de Fabricação</i>	122
7.	CONCLUSÕES	125
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXO A	- PADRÕES DE QUALIDADE	136
ANEXO B	- RELATÓRIOS TÉCNICOS	139
ANEXO C	- DIRETRIZES DE PROJETO DOS PADRÕES QUICKCAST	149

· LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Desenvolvimento histórico das tecnologias relacionadas à prototipagem rápida	2
TABELA 2	- Comparação entre as três fases do desenvolvimento do modelamento geométrico e da prototipagem	7
TABELA 3	- Tarefas essenciais de pós processamento para diferentes sistemas de PR	17
TABELA 4	- Sistemas de prototipagem rápida baseados em líquidos	18
TABELA 5	- Sistemas de prototipagem rápida baseados em sólidos	18
TABELA 6	- Sistemas de prototipagem rápida baseados em pós	19
TABELA 7	- Valores típicos para cálculo da seção sólida crítica de um padrão de SL usando resina SL5170 e sílica crua como material da casca cerâmica	54
TABELA 8	- Parâmetros utilizados na fabricação dos padrões QuickCast™ durante o experimento I	58
TABELA 9	- Delineamento dos ensaios para o experimento III	64
TABELA 10	- Parâmetros de construção utilizados no experimento III	65
TABELA 11	- Fatores de contração utilizados nos estudos de casos de ferramental rápido	73
TABELA 12	- Parâmetros do processo de microfusão utilizados nos estudos de casos I e II	75
TABELA 13	- Parâmetros de construção utilizados nos estudos de casos de rapid tooling	78
TABELA 14	- Classificação das peças fundidas no experimento I	91
TABELA 15	- Medição do teor de cinzas resultante da queima da resina SL5170	96
TABELA 16	- Classificação das peças fundidas no experimento III	97
TABELA 17	- Classificação das peças fundidas no estudo de casos I em ferramental rápido	98
TABELA 18	- Análise dimensional para a tampa de frasco espuma de barbear	102
TABELA 19	- Análise dimensional para o botão regulador de temperatura	103
TABELA 20	- Caracterização da rugosidade superficial dos insertos fundidos	104
TABELA 21	- Caracterização da dureza superficial dos insertos fundidos	105

TABELA 22 - Elementos para análise de tempos e custos de fabricação de insertos através da técnica QuickCast™ Tooling	106
TABELA 23 - Elementos para análise de tempos e custos de fabricação de insertos através de métodos convencionais	106
TABELA 24 - Medições na taxa de vazios em função da forma geométrica da estrutura interna dos padrões Quickcast™	114
TABELA 25 - Medições na taxa de vazios em função do espaçamento da estrutura interna dos padrões Quickcast™	115
TABELA 26 - Tolerância dimensional de peças microfundidas segundo a norma DIN 1680	136
TABELA 27 - Tolerâncias geométricas para peças microfundidas	137
TABELA 28 - Rugosidade superficial de acordo com a norma DIN 4769	138
TABELA 29 - Relatório de fabricação dos padrões QuickCast™	140
TABELA 30 - Análise dimensional das peças no experimento I (válvula de segurança e corpo de válvula)	141
TABELA 31 - Análise dimensional das peças no experimento I (suporte de eixo e junta de vedação)	142
TABELA 32 - Análise dimensional das peças no experimento I (engrenagem e calota esférica)	143
TABELA 33 - Análise dimensional para as peças construídas no experimento III	144

· LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Custos e benefícios em diferentes estágios do processo de desenvolvimento de um produto.....	2
FIGURA 2 - Os três processos fundamentais de fabricação	9
FIGURA 3 - Modelo CAD 3D de uma peça, a representação do modelo fatiado e uma fatia isolada da seção transversal da peça	10
FIGURA 4 - Principais etapas dos processos de prototipagem rápida	11
FIGURA 5 - Modelo CAD tridimensional de uma peça	12
FIGURA 6 - Representação facetada de um arquivo .STL	13
FIGURA 7 - Efeitos de degraus de escada em superfícies inclinadas	14
FIGURA 8 - Suportes prevenindo a deformação e ancorando camadas suspensas	16
FIGURA 9 - Princípio de fabricação por polimerização de resina líquida através de raio laser	20
FIGURA 10 - Princípio de fabricação por polimerização de resina líquida utilizando máscara / lâmpada de ultravioleta	22
FIGURA 11 - Princípio de funcionamento do processo de manufatura por corte e colagem de lâminas ou folhas	23
FIGURA 12 - Princípio de funcionamento do processo de fabricação por fusão e solidificação de fios ou grânulos	25
FIGURA 13 - Princípio de funcionamento do processo de sinterização de partículas por raio laser	26
FIGURA 14 - Princípio de fabricação por união de partículas por colas ou ligantes	27
FIGURA 15 - Principais aplicações dos processos de prototipagem rápida	29
FIGURA 16 - Método direto de construção de ferramentas	34
FIGURA 17 - Método indireto de construção de ferramentas	34
FIGURA 18 - Injeção dos padrões de cera	39
FIGURA 19 - Montagem dos padrões de cera na árvore	39
FIGURA 20 - Composição da casca cerâmica	40
FIGURA 21 - Remoção dos canais e padrões de cera em autoclave	41
FIGURA 22 - Sinterização da casca cerâmica	41
FIGURA 23 - Vazamento do metal líquido no interior do molde cerâmico	42

FIGURA 24 - Quebra da casca cerâmica	42
FIGURA 25 - Acabamento das peças fundidas	43
FIGURA 26 - Estilos de construção: QuickCast™ (à esquerda) e ACES™ (à direita)	46
FIGURA 27 - Padrão de hachura usando triângulos equiláteros	48
FIGURA 28 - Relacionamento entre a taxa de vazios de um padrão QuickCast™ e o rendimento de peças de qualidade	50
FIGURA 29 - Seção transversal de um padrão de SL coberto com casca cerâmica	52
FIGURA 30 - Dados de testes para CTE da resina SL 5170	55
FIGURA 31 - Modelo esquemático referente aos estudos de casos realizados	56
FIGURA 32 - Geometrias de padrões QuickCast™ no experimento I	59
FIGURA 33 - Padrões QuickCast™ utilizados no Experimento I	60
FIGURA 34 - Geometria das peças a serem fabricadas no segundo experimento	63
FIGURA 35 - Geometria dos insertos para a tampa do frasco de espuma de barbear	67
FIGURA 36 - Geometria dos insertos para o botão regulador de temperatura	68
FIGURA 37 - Montagem dos padrões QuickCast™ na árvore de cera	69
FIGURA 38 - Preparação do porta-moldes utilizado	70
FIGURA 39 - Localização do ponto de injeção recomendada: superior	71
FIGURA 40 - Localização do ponto de injeção pré-determinada: lateral	71
FIGURA 41 - Detalhe do sistema de alimentação de plástico para as cavidades	72
FIGURA 42 - Modelo CAD 3D de uma peça, construída em modelador de sólidos	76
FIGURA 43 - Tolerância para conversão do arquivo CAD 3D para o formato STL	76
FIGURA 44 - Posicionamento dos suportes fixando as peças à plataforma de construção	77
FIGURA 45 - Fotografia da SLA250/30A após término da construção dos padrões	79
FIGURA 46 - Etapa de pós-cura em câmara de radiação ultravioleta	80
FIGURA 47 - Padrão QuickCast™ pronto para ser enviado para a fundição	81
FIGURA 48 - Montagem dos padrões Quickcast™ nas árvores de cera	82
FIGURA 49 - Passos do processo de construção do molde cerâmico	83

FIGURA 50 - Etapa de queima dos padrões QuickCast™ e calcinação do molde cerâmico ...	85
FIGURA 51 - Etapa de resfriamento das peças fundidas e quebra da casca cerâmica	85
FIGURA 52 - Peças fundidas após acabamento com jateamento de areia	86
FIGURA 53 - Aplicação dos fatores de compensação da contração	89
FIGURA 54 - Resultados da análise termogravimétrica da resina SL5170	93
FIGURA 55 - Resultados da análise dilatométrica da resina SL5170	95
FIGURA 56 - Fotografia dos insertos fundidos no estudo de casos I obtidos pela eliminação da etapa de deceramento	99
FIGURA 57 - Fotografia dos insertos fundidos no estudo de casos I pelo processo tradicional de microfusão	100
FIGURA 58 - Insertos QuickCast após acabamento superficial	100
FIGURA 59 - Peças injetadas nos insertos QuickCast tooling	100
FIGURA 60 - Pontos de medição nos insertos QuickCast™	101
FIGURA 61 - Pontos de medição nas peças injetadas	102
FIGURA 62 - Incerteza dimensional do inserto tampa de frasco espuma de barbear	103
FIGURA 63 - Incerteza dimensional do inserto botão regulador de temperatura	104
FIGURA 64 - Diagrama de tempo de fabricação do ferramental QuickCast™	107
FIGURA 65 - Diagrama de custos de fabricação do ferramental QuickCast™	107
FIGURA 66 - Quebras da casca cerâmica devido à expansão térmica dos padrões	108
FIGURA 67 - Penetração do material cerâmico no interior do padrão QuickCast™	110
FIGURA 68 - Geometrias de células da estrutura interna dos padrões QuickCast™	113
FIGURA 69 - Quebra da casca cerâmica devido à expansão térmica dos padrões QuickCast™	116
FIGURA 70 - Gráfico comparativo de tempo de fabricação: método convencional x QuickCast Tooling	122
FIGURA 71 - Gráfico comparativo dos custos de fabricação: método convencional x QuickCast Tooling	123

SIMBOLOGIA

3D	Tridimensional
3DP	Tridimensional Printing ou Impressão Tridimensional
ACES	Accurate Clear Epoxy Solid, estilo de construção na estereolitografia
CAD	Computer Aided Design ou Projeto Assistido por Computador
CAE	Computer Aided Engineering ou Engenharia Assistida por Computador
CAM	Computer Aided Manufacturing ou Fabricação Assistida por Computador
CNC	Computer Numerical Control ou Controle Numérico por Computador
CTE	Coefficient Termal Expansion ou Coeficiente de Expansão Térmica
EDM	Eleetro Deposition Machining ou Usinagem por Eletroerosão
FDM	Fused Deposition Modeling ou Fusão e Deposição de Materiais
FFF	Free Form Fabrication ou Fabricação de Formas Livres
LENS	Laser Engineering Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing ou Fabricação de Objetos por Laminação
NC	Numerical Control ou Controle Numérico
RP	Rapid Prototyping ou Prototipagem Rápida
RT	Rapid Tooling ou Ferramental Rápido
RTV	Room Temperature Vulcanization ou Vulcanização de Silicone à Temperatura Ambiente
SGC	Solid Groung Curing
SL	Stereolithography ou Estereolitografia
SLA	Stereolithography Apparatus ou Máquina de Estereolitografia
SOP	Solid Object Printing ou Impressão de Objetos Sólidos
STL	Stereolithography Files, formato padrão de arquivos para RP

RESUMO

Recentemente, diversas tecnologias de prototipagem rápida têm surgido para reduzir os tempos inerentes às re-iterações e ajustes necessários para criar um produto de alta qualidade. Estas tecnologias oferecem a capacidade de produzir, rapidamente, objetos sólidos tridimensionais diretamente a partir de dados gerados em sistemas CAD.

Os modelos fabricados usando métodos de prototipagem rápida, possuem um enorme potencial na indústria de fundição. Estas tecnologias podem ser usadas com diferentes procedimentos de fundição e ser de grande valor para a fabricação de peças metálicas funcionais, bem como para a produção de ferramentas, que, no caso da indústria de componentes plásticos, poderia ser aplicada à fabricação de insertos para moldes de injeção.

Uma destas técnicas de prototipagem rápida, e a que será mais diretamente estudada nesta pesquisa, é a estereolitografia (SL) que possibilita a construção de modelos destinados ao processo de microfusão ou *investment casting*, diretamente a partir do modelo CAD da peça desejada. Isto possibilita a substituição dos tradicionais modelos de cera pelos modelos em resina fotocurável, com a vantagem de não se necessitar de ferramentas para gerar os padrões para fundição.

Para atingir os objetivos propostos foi utilizada uma sistemática baseada no desenvolvimento de estudos de casos direcionados tanto para a fabricação de protótipos metálicos funcionais quanto para a fabricação de insertos para moldes destinados ao processo de moldagem por injeção. São abordados aspectos relacionados com as características construtivas dos padrões de SL para microfusão e seu comportamento durante o processo de microfusão, bem como aspectos visando avaliar a potencialidade da técnica de '*QuickCast Tooling*' utilizando padrões de SL e o processo de microfusão na fabricação dos insertos.

ABSTRACT

Recently, several technologies of rapid prototyping have been appearing to reduce the inherent times to the re-iterations and necessary adjusts to create a product of high quality. These technologies offer the capacity to produce, quickly, three-dimensional solid objects directly from data generated in CAD systems.

The manufactured models using methods of rapid prototyping have an enormous potential in the foundry industry. These technologies can be used with different foundry procedures and to be of great value for the production of functional metallic parts, as well as for the production of tools, that, in the case of the industry of plastic components, it could be applied to the production of inserts for injection molds.

One of these techniques of rapid prototyping, and the one that will be more directly studied in this research, it is the stereolithography (SL) that facilitates the construction of models destined to the investment casting process, directly starting from the CAD model of the requested part. This facilitates the substitution of the traditional wax models for the models of photocurable resin, with the advantage of not needing of tools to generate the patterns for foundry.

To reach the proposed objectives, it was used a systematic based on the development of studies of cases addressed so much for the production of functional metallic prototypes as for the production of inserts for molds destined to the injection molding process. Aspects related with the constructive characteristics of the SL patterns and its behavior are approached during the investment casting process, as well as aspects seeking to evaluate the potentiality of QuickCast Tooling technic using SL patterns and the investment casting process in the production of the inserts.

Capítulo

1

Introdução**1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Em um mercado cada vez mais globalizado, o crescente espectro de produtos oferecidos a preços competitivos vem forçando as empresas a procurar meios de desenvolver seus produtos de maneira mais rápida e mais barata. A exigência atual é que novos produtos sejam lançados com uma frequência maior do que no passado e ainda assim tenham melhor qualidade, maior variedade de modelos e custos mais baixos, tudo isso num intervalo de tempo cada vez menor [10,15]. O ciclo de vida dos produtos no mercado foi reduzido drasticamente. Sem uma engenharia ágil, que se integre bem ao *design* e ao *marketing*, fica muito difícil lançar novos produtos com a qualidade e velocidade exigidas pelo mercado [51].

Segundo BAXTER [7], os estágios iniciais no processo de desenvolvimento de novos produtos são os mais importantes, pois são nestes estágios que muitas decisões importantes são tomadas, apesar de a pesquisa só ter ocorrido no papel e os trabalhos de projeto consistem apenas de desenhos e modelos baratos. Os gastos com o desenvolvimento ainda são relativamente pequenos e a relação custo/benefício nos estágios iniciais de desenvolvimento é bem mais favorável do que nos estágios posteriores, onde a introdução de mudanças pode implicar em custos elevadíssimos.

A figura 1 mostra que durante o processo de projeto, tanto a flexibilidade quanto o potencial de economia diminuem ao longo do tempo, ao mesmo tempo observa-se um aumento dos custos e do trabalho gasto com modificações. Portanto é importante desenvolver um produto que exija o mínimo de correções quando colocado no mercado [7,29].

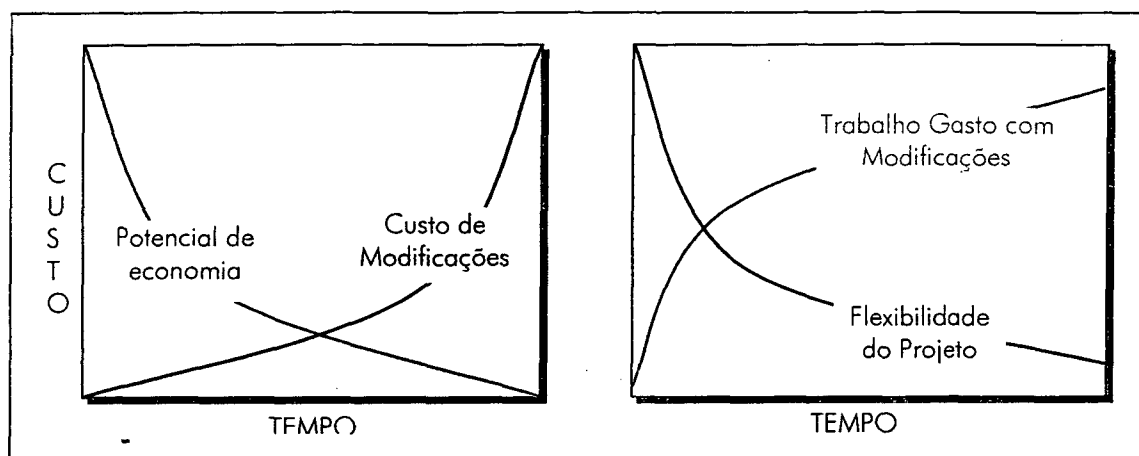


Figura 1 – Custos e benefícios em diferentes estágios do processo de desenvolvimento de um produto.

Diversas tecnologias de prototipagem rápida surgiram nos últimos anos visando reduzir o tempo gasto especialmente durante a fase de desenvolvimento de um novo produto. Estas tecnologias permitem criar objetos sólidos diretamente a partir de dados gerados em sistemas CAD. No entanto, a maioria das técnicas de prototipagem rápida ainda são bastante limitadas em relação à variedade de materiais para construção dos protótipos [51,78]. Conseqüentemente, embora seja possível a verificação geométrica e dimensional, testes funcionais de protótipos muitas vezes não são possíveis devido às diferentes propriedades físicas (mecânicas, térmicas ou elétricas) entre o protótipo e a peça de produção [37].

Os métodos de prototipagem rápida possibilitam o desenvolvimento de diversas aplicações na indústria de fundição, podendo ser utilizadas para a fabricação de protótipos metálicos funcionais, bem como para a produção de ferramentas metálicas fundidas. Apesar de o processo de microfusão ter permanecido semelhante durante milhares de anos, a fabricação dos modelos de fundição pelos tradicionais artesãos tem sido substituída por métodos modernos de prototipagem rápida como a estereolitografia, por exemplo. Padrões de fundição fabricados por técnicas de prototipagem rápida são muito vantajosos para empresas da área de fundição, pois permitem a substituição dos usuais padrões de cera pelos padrões em resina, resultando em um encurtamento do ciclo de desenvolvimento de um produto [25,40,49,56]. Além disso, o uso de padrões obtidos por estes processos, quando usados para

a fabricação de pré-séries de peças, tem oferecido aos projetistas da área de fundição uma ferramenta poderosa para verificação de aspectos técnicos como: forma, aparência, montabilidade, funcionalidade, etc., pois, muitas iterações podem ser testadas antes de se solicitar o ferramental definitivo, resultando em uma possível redução nos custos associados com o retrabalho em moldes, resultado de mudanças no projeto [25,37].

Uma outra igualmente importante e promissora aplicação das tecnologias de prototipagem rápida é a possibilidade de produzir ferramentas que podem ser utilizadas, por exemplo, para fabricação de insertos para o processo de moldagem por injeção de plásticos. Estas ferramentas podem ser usadas, tipicamente, para produzir dezenas, centenas ou mesmo milhares de peças dependendo dos processos e materiais utilizados. Nesta pesquisa será estudada a técnica *QuickCast Tooling* que baseia-se na fabricação de insertos microfundidos utilizando padrões de estereolitografia como modelos de fundição.

1.2. ENFOQUE E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Apesar de as tecnologias de prototipagem rápida serem bastante recentes (com o primeiro sistema comercialmente vendido em 1989), em países onde já se usam estes sistemas há alguns anos, o processo de estereolitografia aplicado à fundição tem sido utilizado principalmente para fabricação de protótipos e pequenos lotes de peças funcionais. Entretanto, ainda é pouco explorado no Brasil, especialmente para aplicações na área de fabricação de moldes para injeção de plásticos. Existe, portanto, um campo de pesquisa que ainda deve ser explorado visando conhecer as potencialidades e limitações do processo de estereolitografia quando aplicado à confecção de protótipos e insertos para moldes através da microfusão.

Diferentemente do que acontece em outros países, como os Estados Unidos por exemplo, onde a indústria tem estabelecido centros de pesquisa em diversas áreas de aplicação da prototipagem rápida, com objetivos de desenvolver novos sistemas, processos e materiais, bem como de educar e treinar mais engenheiros nesta área, no Brasil, o processo de aprendizado e de desenvolvimento de pesquisas nesta área está apenas iniciando e ainda de uma forma isolada, sem muita participação da indústria.

O enfoque pretendido nesta pesquisa está relacionado, portanto, com a aplicação destas duas tecnologias: estereolitografia e microfusão na fabricação de protótipos metálicos funcionais, bem como de insertos para moldes destinados ao processo de moldagem por injeção. Estas áreas têm apresentado níveis de interesse bastante grandes, sendo tema de recentes conferências e prioridade para os desenvolvedores de sistemas e materiais nesta área.

1.3 OBJETIVOS

Geral

- O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar a utilização das tecnologias de **Estereolitografia** e **Microfusão** para a fabricação de protótipos metálicos funcionais, bem como de insertos para moldes de injeção de plásticos, apresentando suas vantagens e limitações, fundamentadas no desenvolvimento de estudos de casos.

Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico visando apresentar as principais tecnologias de prototipagem rápida disponíveis para a produção de modelos para fundição, descrevendo seus princípios de funcionamento, materiais utilizados, e principais aplicações.
- Estudar a influência de parâmetros de construção dos padrões de estereolitografia destinados ao processo de microfusão e verificar o comportamento destes durante as principais etapas do processo de fabricação, visando a obtenção de peças de qualidade equivalente às que utilizam modelos de cera.
- Identificar as limitações existentes em relação ao uso das tecnologias de estereolitografia e microfusão para fabricação de protótipos e insertos para moldes de injeção de plásticos, bem como determinar os fatores de incerteza dimensional no processo de fabricação.
- Finalmente, a pesquisa propõe-se a apresentar diretrizes para o projeto dos modelos ou padrões para o processo de microfusão, buscando, através dos estudos de caso, identificar os problemas e restrições de ordem prática, visando produzir peças de qualidade e dimensionalmente compatíveis com as atuais, que utilizam modelos de cera.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para uma melhor compreensão do conteúdo deste trabalho, organizou-se sua apresentação em seis capítulos. Cada um destes capítulos tem aqui seus assuntos brevemente descritos:

- ♦ **Capítulo I : Introdução** – Neste capítulo procurou-se delimitar o problema a ser estudado e familiarizar o leitor com o tema que se propõe explorar, apresentando os objetivos que se buscará atingir.
- ♦ **Capítulo II : Prototipagem Rápida: Princípios e Aplicações na Manufatura** - Este capítulo visa apresentar os aspectos gerais das tecnologias de prototipagem rápida, seus conceitos mais importantes, explicando os princípios de funcionamento dos processos mais importantes disponíveis, suas aplicações na manufatura, vantagens e limitações.
- ♦ **Capítulo III : Considerações sobre Padrões de Estereolitografia para Microfusão** – O capítulo III inicia com uma descrição das etapas do processo tradicional de microfusão e sua evolução até chegar em uma nova abordagem para fabricação dos padrões de fundição: a prototipagem rápida. Segue-se, então, uma descrição do processo de desenvolvimento dos padrões QuickCast™, suas características construtivas e sua adequação ao processo de microfusão.
- ♦ **Capítulo IV : Procedimentos Experimentais** – Neste capítulo é apresentada uma sistemática de procedimentos para a realização dos estudos de casos que servirá para guiar as ações a serem tomadas no decorrer dos trabalhos práticos de forma a permitir sua compreensão e funcionamento.
- ♦ **Capítulo V : Resultados Obtidos** – No capítulo V são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais dos estudos de casos realizados neste trabalho.
- ♦ **Capítulo VI : Análise dos resultados e Conclusões** – O capítulo VI é destinado a análise dos resultados dos estudos realizados apresentando as potencialidades e dificuldades na aplicação da técnica proposta. Serão discutidos os resultados dos estudos sobre os parâmetros de construção dos padrões de estereolitografia e sua influência no comportamento de queima durante o processo de microfusão. Também serão discutidos aspectos relativos à análise da viabilidade de fabricar insertos para moldes de injeção de plásticos utilizando as tecnologias de estereolitografia e microfusão. Finalmente serão apresentadas as conclusões obtidas, bem como propostas de melhorias e sugestões para novas pesquisas e trabalhos nas áreas de prototipagem e ferramental rápidos.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O declínio do custo dos computadores, especialmente dos PC's e mini-computadores está mudando a maneira como as indústrias trabalham. Um aumento no uso de computadores tem estimulado os avanços em muitas áreas relacionadas à computação, como CAD, CAM e CNC. Em particular, a emergência de sistemas de prototipagem rápida não teria sido possível sem a existência do CAD [15]. Entretanto, quando se examina os numerosos sistemas disponíveis hoje, pode-se facilmente concluir que, junto com o CAD, muitas outras tecnologias e avanços em outras áreas como: sistemas de manufatura e materiais também são essenciais para o desenvolvimento das tecnologias de prototipagem rápida. A tabela.1 mostra o desenvolvimento histórico das diversas tecnologias e as datas estimadas de concepção, segundo CHUA e LÉONG [12].

Tabela 1 – Desenvolvimento histórico das tecnologias relacionadas à prototipagem rápida

Ano da Concepção	Tecnologia
1770	Mecanização
1946	Primeiro computador
1952	Primeira máquina-ferramenta de comando numérico
1960	Primeiro sistema laser comercial
1961	Primeiro robô comercial
1963	Primeiro sistema gráfico interativo (versão anterior de CAD)
1988	Primeiro sistema de prototipagem rápida.

A prototipagem ou construção de modelos é uma prática muito antiga. A intenção de ter um protótipo¹ físico é compreender o conceito do *design* (forma, funcionalidade, montagem, interferências, etc.). Assim, um protótipo é usualmente requerido antes do início da produção em massa do produto.

Segundo CHUA e LEONG [12], o desenvolvimento da prototipagem e do modelamento geométrico podem ser separados em três fases distintas, das quais, as duas últimas apareceram somente nos últimos 20 anos. A tabela 2 apresenta as principais características destas três fases no desenvolvimento da prototipagem e do modelamento geométrico.

Tabela.2 – Comparação entre as três fases do desenvolvimento do modelamento geométrico e da prototipagem [12].

Modelamento Geométrico	Prototipagem
<p>❶ Primeira fase: 2D Wireframe</p> <ul style="list-style-type: none"> • Até meados da década de 1960. • Desenhos compunham-se de vistas de componentes mecânicos, linhas de circuito elétrico. • Desenhos 2D (<i>drafting</i>). 	<p>❶ Primeira fase: Prototipagem manual</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baseado na habilidade adquirida durante anos. • Ferramentas convencionais, formão, lixas. • Uso de materiais existentes na natureza: madeira, metais, pedras, etc.
<p>❷ Segunda fase: Modelamento de superfícies</p> <ul style="list-style-type: none"> • Iniciou em meados da década de 1970. • Aumento da complexidade. • Representa mais informação sobre a forma precisa, tamanho e superfície de contorno das peças. 	<p>❷ Segunda fase: Prototipagem virtual</p> <ul style="list-style-type: none"> • Meados da década de 1970. • Aumento da complexidade. • Protótipos obtidos a partir de moldes de silicone podem ser testados, e simulados com propriedades similares às de alguns materiais.
<p>❸ Terceira fase: Modelamento de sólidos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Início dos anos 1980. • O computador pode determinar o lado interno e externo do objeto. Talvez mais importante ainda, ele pode traçar seções no objeto e rapidamente localizar todas as superfícies e arestas de intersecção. • Não há ambigüidades na interpretação de <i>features</i> de um objeto. 	<p>❸ Terceira fase: Prototipagem rápida</p> <ul style="list-style-type: none"> • Final da década de 1980. • Protótipos construídos muito rapidamente e principalmente copiando fielmente os dados CAD. • Protótipos podem ser testados e simulados com propriedades bem mais próximas para alguns materiais. • Protótipos conhecidos como <i>FreeForm Fabrication (FFF)</i>.

¹ Um protótipo é um primeiro exemplo de alguma coisa que foi ou será desenvolvida. É um modelo ou versão preliminar [6].

A seguir são apresentadas algumas vantagens e desvantagens dos sistemas de prototipagem rápida disponíveis hoje no mercado para fabricação de protótipos.

VANTAGENS : os benefícios decorrentes do uso da tecnologia de prototipagem rápida, entre outros, segundo [25,35,47] são:

- Identificar erros no projeto que não são aparentes no arquivo CAD tridimensional da peça e, com isso, fazer mudanças no projeto rapidamente.
- A possibilidade de verificar hipóteses e considerações feitas nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto.
- Facilitar a comunicação entre equipes multifuncionais ao longo de todas as etapas de desenvolvimento de um produto.
- Identificar e corrigir problemas no ferramental antes que as ferramentas definitivas sejam construídas, eliminando os altos custos devido a retrabalhos no ferramental.
- Possibilidade de fazer avaliações detalhadas do produto levando em consideração: o *design* e a funcionalidade.
- Confirmar a fabricabilidade e montabilidade das partes de um produto.
- Dedicar mais tempo para desenvolver a criatividade, melhorando o *design*, a funcionalidade e obtendo um produto otimizado.
- Receber o *feedback* e aprovação do consumidor.
- Capacidade de reduzir significativamente o tempo até que o produto chegue ao mercado, resultando em (i) riscos menores de insucesso do produto, (ii) produtos que melhor satisfazem às necessidades do consumidor, (iii) produtos que ofereçam uma relação preço/performance favorável ao consumidor.
- Proporcionar um aumento na diversidade de produtos e perseguir nichos de mercado atualmente muito pequenos devido aos altos investimentos em ferramental.

LIMITAÇÕES: algumas limitações das tecnologias de prototipagem rápida segundo [25,35,47], atualmente, são:

- Pequena variedade de materiais disponíveis para a maioria dos sistemas de prototipagem rápida.
- Materiais com propriedades físicas (mecânica, térmica e elétrica) diferentes dos materiais finais de produção.

- Propriedades mecânicas das peças fabricadas por prototipagem rápida inferiores às obtidas por outros processos de fabricação como, por exemplo, moldagem por injeção, usinagem, forjamento, entre outros.
- Custo das peças fabricadas por prototipagem rápida ainda é bastante alto.
- Volume de trabalho das máquinas ainda é muito limitado. Na maioria dos sistemas não ultrapassa 600mm x 600mm x 600mm.
- Detalhes muito pequenos como texturas, ranhuras, gravações, etc. não são reproduzidos satisfatoriamente.
- Alguns sistemas necessitam de demoradas operações de limpeza e tratamento superficial das peças que saem da máquina.

2.2 FUNDAMENTOS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS

Segundo JACOBS [36], existem três processos de fabricação fundamentais como mostrado na figura 2: o processo subtrativo, o aditivo e o conformativo.

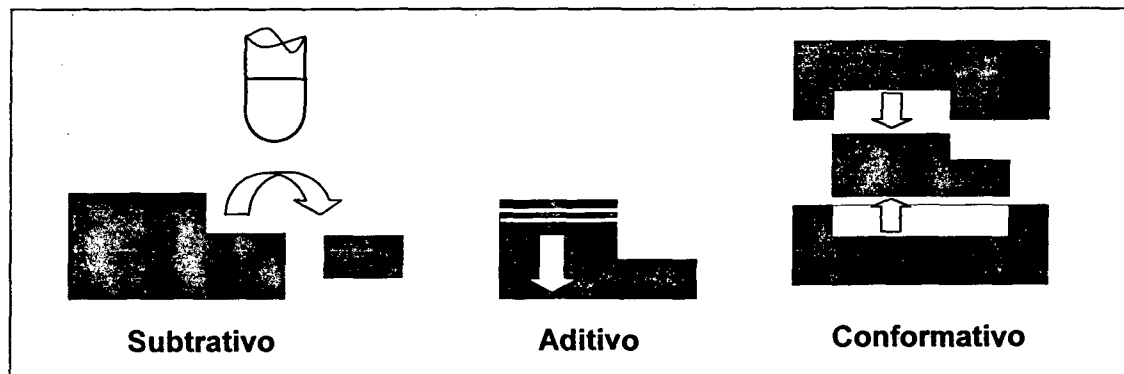


Figura 2 – Os três processos fundamentais de fabricação [36].

No processo **subtrativo**, inicia-se com um bloco de material sólido maior que o tamanho final do objeto desejado e o material é removido até que a forma desejada seja obtida. Em contraste, um processo **aditivo** é o inverso do subtrativo, onde o produto final possui muito mais material do que quando ele iniciou o processo. O material é manipulado de forma que sucessivas porções deste combinem-se para formar o objeto desejado. Finalmente o processo **conformativo** é aquele onde forças mecânicas ou restritivas são aplicadas sobre o material para se obter a forma desejada.

Diferentemente dos processos tradicionais de usinagem, que são por natureza subtrativos, os sistemas de prototipagem rápida constroem os protótipos através da adição sucessiva de finas camadas de materiais, tais como plásticos, metais, papéis e cerâmicas.

Atualmente, existem diversos processos de prototipagem rápida, alguns já bem conhecidos e outros ainda em desenvolvimento. Estes processos usam uma variedade de tecnologias e princípios de fabricação diferentes para a produção da peça, entretanto, cada um destes possui muitos conceitos em comum [12,22,37,51,66] :

- Definição da geometria da peça em um sistema CAD
- Fatiamento do modelo geométrico em camadas discretas bidimensionais
- Fabricação do modelo físico tridimensional, camada por camada.

O produto ou componente que se deseja prototipar deve ser modelado em um sistema CAD. Este modelo, que representa a peça física a ser construída, deve ser representado como superfícies fechadas, as quais, definem um volume fechado [12,22]. Com base neste arquivo CAD, a peça é dividida em inúmeras seções planas (fatias) por programas especiais. Estas seções transversais são sistematicamente recriadas tanto através da solidificação de líquidos, como fundindo pós ou por colagem de lâminas para formar o objeto sólido [37].

A figura 3 mostra um modelo sólido de uma peça, o modelo desta após o fatiamento e uma fatia isolada ou seção transversal da peça em determinada posição.

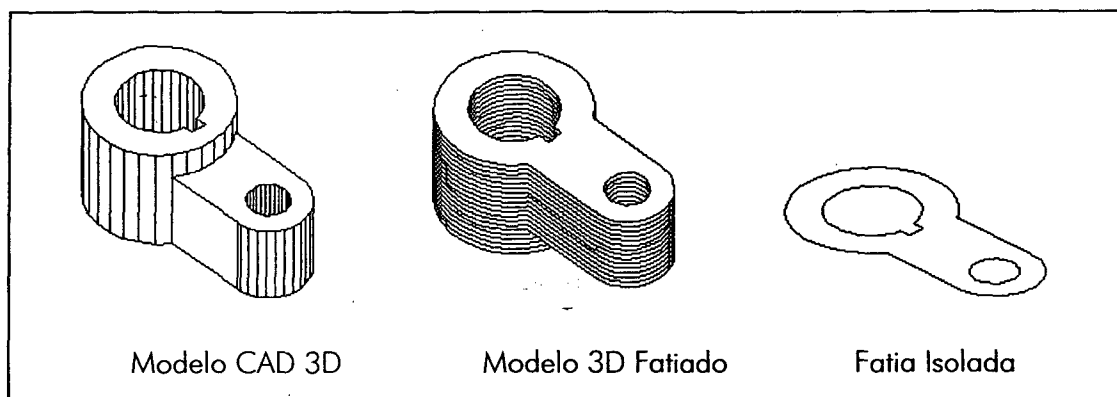


Figura 3 – Modelo CAD 3D de uma peça, a representação do modelo fatiado e uma fatia isolada da seção transversal da peça.

Em um sistema de prototipagem rápida, as fatias são construídas umas sobre as outras, gerando-se assim o protótipo, ou a peça propriamente dita. O protótipo é, portanto, uma aproximação do modelo teórico, cuja precisão dimensional é determinada pelo número e espessura das camadas horizontais. Como a espessura de cada camada é da ordem de frações de milímetros, essa aproximação é considerada aceitável para algumas aplicações [37,71].

A grande vantagem dos sistemas de prototipagem rápida é que a geometria das peças geralmente independe do processo de construção. Assim, peças complexas, com grande número de detalhes podem ser construídas tão facilmente quanto uma outra simples e de dimensões externas similares [12]. Dependendo desta complexidade, a fabricação por métodos convencionais poderia levar dias, ao passo que usando sistemas de prototipagem rápida este tempo poderia ser reduzido a um ou dois dias ou mesmo horas.

2.3 ETAPAS GERAIS DOS PROCESSOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Tal como os demais processos de fabricação, o planejamento do processo é uma importante tarefa a ser executada antes de se iniciar a construção do protótipo. Vários parâmetros e fatores que influenciam a performance de cada operação devem ser examinados e decididos. Por exemplo, se um equipamento de estereolitografia é usado para construir uma peça, a orientação da peça é um fator importante que poderia, entre outras coisas, influenciar a qualidade da peça e a velocidade do processo [36].

Todos os sistemas de prototipagem rápida passam por etapas similares durante a construção de um protótipo. Estas etapas estão representadas na figura 4. Existe, em geral, um total de oito etapas no processo de fabricação usando técnicas de prototipagem rápida, algumas destas podem não existir em alguns sistemas ou são executadas automaticamente, porém a ampla maioria dos processos de prototipagem rápida passam por todas estas etapas [12,36].

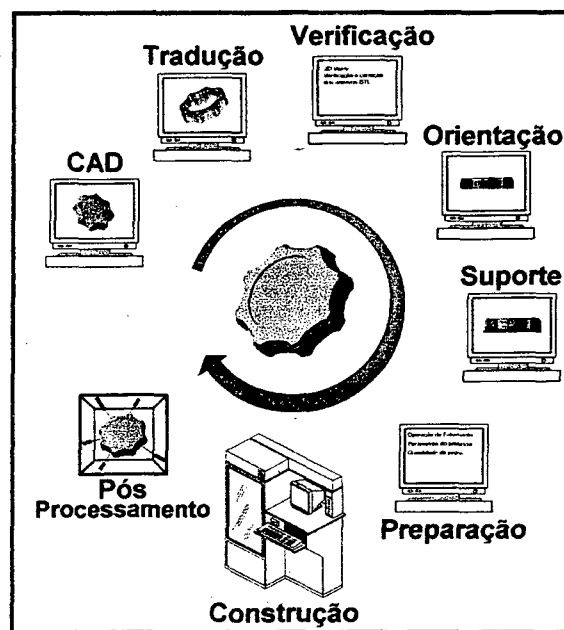


Figura 4 - Principais etapas dos processos de prototipagem rápida.

2.3.1 Modelamento CAD 3D

O modelamento CAD tridimensional é um pré-requisito geral em todos os processos de prototipagem rápida e é, usualmente, a etapa que consome mais tempo em toda a cadeia do processo [12]. É muito importante que os modelos geométricos possam ser compartilhados pela equipe de projeto para diferentes propósitos, como estudos de interferência, análise de tensões, projeto dos componentes e planejamento da manufatura [15]. Muitos sistemas CAD/CAM possuem, hoje, módulos especiais para estes propósitos.

Diferentemente do que ocorre com a programação de comando numérico onde uma única superfície ou mesmo uma linha pode ser um elemento de comando numérico, a prototipagem rápida requer um volume fechado do modelo, isto é, os dados devem especificar um lado interno, um lado externo e as fronteiras do modelo [22,30,50]. Este requisito assegura que todas as seções transversais são curvas fechadas, criando, assim, um objeto sólido, conforme ilustrado na figura 5. Exemplos de considerações que devem ser examinados nesta etapa incluem: a orientação das peças, necessidade de suportes, existência de paredes finas, de detalhes muito pequenos como furos ou aberturas de dimensões muito reduzidas, texturas, etc.

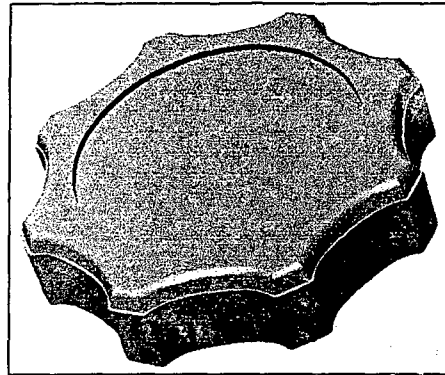


Figura 5 – Modelo CAD tridimensional de uma peça

2.3.2 Tradução e Transmissão de Dados

O arquivo com modelo CAD 3D da peça a ser construída deve ser convertido para um arquivo apropriado para o processamento pelos sistemas de prototipagem rápida. Os principais formatos de conversão são o STL, IGES, SLC, entretanto o mais amplamente utilizado é o formato STL que aproxima as superfícies do modelo usando uma representação de triângulos e suas normais, ou seja, este arquivo consiste, basicamente, de coordenadas X,Y e Z dos três vértices de cada triângulo da superfície, bem como um índice que descreve a orientação da superfície normal [2,3,22] (figura 6). Esta última informação é necessária para assegurar a distinção entre superfícies internas e externas.

Uma outra limitação na conversão para o formato .STL está relacionada com a precisão. Este é um fator importante atualmente porque os modelos produzidos por prototipagem rápida não são usados apenas para propósitos de verificação do *design*. A precisão tem sido melhorada para atender às aplicações nas áreas de fabricação de ferramentas [22].

Superfícies muito curvas necessitam, tipicamente, de uma quantidade muito grande de triângulos para reproduzi-las adequadamente [2,3]. Em geral, geometrias de peças plásticas injetadas são complexas, possuindo muitas superfícies livres, arredondamentos e nervuras, o que requer um molde com as mesmas características. Por isso é importante que durante a conversão para o formato STL seja usada uma alta resolução para os ângulos e tolerâncias apertadas para que a aproximação da superfície seja mais próxima da desejada [22]. Para reduzir os erros induzidos por estas aproximações, deve-se aumentar a resolução do arquivo .STL, aumentando o número de triângulos usados para representar uma superfície.

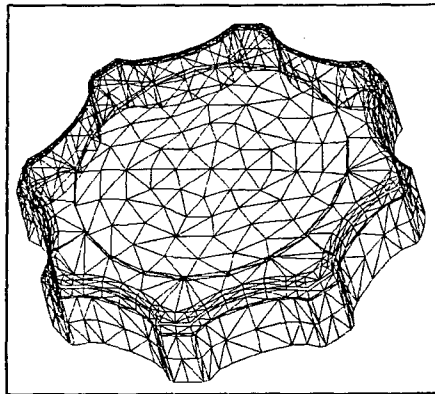


Figura 6 – Representação facetada de um arquivo .STL

2.3.3 Verificação

Nem sempre os arquivos CAD são convertidos de maneira satisfatória para o formato STL e apresentam erros na sua representação. Na maioria das vezes, estes defeitos são provenientes de interfaces CAD-STL não muito robustas [22]. Os problemas mais comuns são: triângulos que não se conectam, gerando falhas ou aberturas na superfície do modelo, triângulos que são perdidos durante a conversão para o formato STL, orientação invertida dos vetores que compõem um triângulo, principalmente em *fillets* ou regiões densamente povoadas de triângulos, entre outros [12,22]. Estes problemas, se não retificados, resultarão em freqüentes falhas mais à frente. Uma vez que os arquivos .STL

foram verificados e estão livres de erros parte-se para a preparação do modelo para a fabricação.

2.3.4 Orientação

A orientação e posicionamento relativo das peças a serem prototipadas é o próximo passo a ser executado. Este pode ser feito utilizando os *softwares* de preparação incluídos no próprio sistema de prototipagem rápida ou em um *software* CAD. As seguintes informações descrevem os requisitos e sugestões para obter melhores resultados na construção de peças de alta qualidade [2,12,30,36,77]:

- Orientar superfícies esteticamente importantes de forma que fiquem paralelas ao plano XY, pois, superfícies horizontais e verticais são mais lisas que as inclinadas devido ao efeito de degraus de escada (figura 7).
- Maximizar o número de seções transversais curvas desenhadas no plano horizontal. Altas resoluções podem ser conseguidas no plano horizontal.
- Minimizar o número de superfícies inclinadas. Estas superfícies são construídas de camadas sobrepostas, cuja superfície tem a aparência de escada, com a espessura da camada correspondendo a altura do degrau.

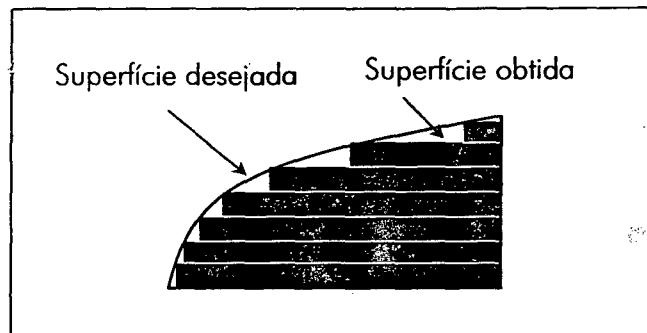


Figura 7 - Efeitos de degraus de escada em superfícies inclinadas

- Certificar-se que as peças encaixam-se no reservatório. Se a peça é muito grande ela pode ser subdividida e remontada durante o pós processamento.
- Em sistemas que exigem suportes, deve-se procurar minimizar a altura deste. Suportes muito altos levam muito tempo para serem construídos e podem distorcer ou se curvar, quando o peso da peça aumenta.

- Minimizar a altura total do objeto. Isto reduz o número de camadas a serem construídas, reduzindo, assim, o tempo de construção da peça.
- Otimizar a drenagem da peça reduzindo o número de áreas que podem reter resina líquida durante a construção da peça.

A importância de cada um destes fatores é determinada pelos objetivos na construção da peça.

2.3.5 Geração dos Suportes

Alguns sistemas de prototipagem rápida constroem seus protótipos sobre estruturas de suporte ao invés de construí-los diretamente sobre a plataforma do sistema. As principais razões para isso são [2,12,30]:

- Prender a peça firmemente sobre a plataforma.
- Suportar áreas não sustentadas pela própria peça, como bases de apoio, principalmente em sistemas que usam resinas líquidas.
- Separar o objeto da plataforma. Isto assegura que os dois sejam facilmente separados durante o pós-processamento sem danificar a peça. Isto também assegura que a primeira camada da peça possua uma espessura uniforme, mesmo se a plataforma estiver inclinada.
- Reduzir distorções durante o processo de construção.
- Adicionalmente, em sistemas que utilizam resinas líquidas, a separação permite que a resina seja drenada mais rapidamente da plataforma, reduzindo o tempo de pós processamento.

Deve-se evitar a colocação de suportes sobre superfícies que precisam ter um bom acabamento superficial, pois os restos de suportes não removidos normalmente permanecem na superfície da peça e devem ser retirados por corte, jateamento de areia ou lixamento. Também deve-se tomar o cuidado de não colocar suportes em regiões de difícil acesso, o que pode dificultar a sua remoção [2]. A figura 8 ilustra a colocação de suportes para a construção de uma xícara.

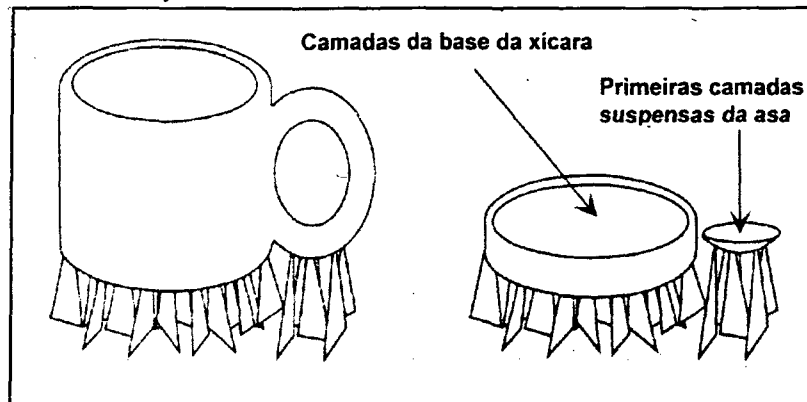


Figura 8 - Suportes prevenindo a deformação e ancorando camadas suspensas

2.3.6 Preparação para Construção

A preparação é a ação final na construção de peças por prototipagem rápida. É nesta etapa que ocorre a geração do programa de comando numérico usado para construir as peças. Os arquivos do programa de comando numérico contém todas as informações que a máquina de prototipagem necessita para construir a peça física e seus suportes [2,4,46].

Diversas ações são executadas durante a etapa de preparação, como, por exemplo, a seleção de parâmetros tecnológicos e operacionais visando assegurar uma maior precisão dos protótipos fabricados [46]. Entretanto, devido às diferenças construtivas e de funcionamento dos diferentes sistemas de prototipagem rápida existentes, cada um contém um conjunto de ações ou requisitos específicos para ele nesta fase. Por exemplo, em alguns sistemas, determinados parâmetros tecnológicos devem ser selecionados, como, por exemplo, espessura de camada, tipo de material, estilos de construção, fatores de contração da resina, etc [36]. Já em outros sistemas, ou estes parâmetros não existem, ou são selecionados automaticamente. Alguns parâmetros só existem em determinados processos, no entanto, são importantes para tornar o processo flexível e assegurar melhor qualidade e precisão das peças [36].

2.3.7 Construção

Para a maioria dos sistemas de prototipagem rápida este passo é completamente automatizado [12]. Assim, é usual para os operadores deixarem a máquina ligada construindo as peças durante a noite. O processo de construção pode levar muitas horas dependendo do tamanho e da quantidade de peças a serem fabricadas.

2.3.8 Pós Processamento

A tarefa final de toda a cadeia de confecção de um protótipo é a etapa de pós processamento. Neste estágio, em geral, algumas operações manuais são necessárias. Como resultado, o perigo de danificar a peça é particularmente alto. As tarefas necessárias para o pós processamento para alguns dos sistemas de prototipagem rápida existentes são mostradas na tabela 3 [8].

Tabela 3 : Tarefas essenciais de pós processamento para diferentes sistemas de PR.
(✓ = requerido; ✗ = não requerido)

Tarefas de pós processamento	Tecnologias de Prototipagem Rápida			
	SLS	SL	FDM	LOM
Limpeza	✓	✓	✗	✓
Pós Cura	✗	✓	✗	✗
Acabamento Superficial	✓	✓	✓	✓

A tarefa de limpeza refere-se à remoção do excesso de material que pode permanecer sobre a peça. Assim, para peças feitas por SL por exemplo, este material refere-se ao excesso de resina que fica retida em porções côncavas da peça bem como a remoção dos suportes [1,8]. Similarmente, para peças feitas por SLS, o excesso de pó deve ser removido. Igualmente para o processo LOM, partes semelhantes a blocos de papel que atuam como suportes também devem ser removidos [8].

Segundo BLAIR [8], a precisão das peças obtidas por prototipagem rápida também está relacionada com as operações de acabamento. O acabamento refere-se aos processos secundários como jateamento em areia, lixamento, polimento e pintura usados para melhorar o aspecto superficial ou a aparência estética da peça. Esta etapa também pode incluir processos de usinagem como furação, fresamento e torneamento para acrescentar determinados *features* à peça.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Existem muitas maneiras pelas quais se podem classificar os diversos sistemas de prototipagem rápida. Uma destas maneiras é classificá-los, genericamente, pela forma inicial do material com que os protótipos são construídos e conseqüentemente pelo princípio de fabricação destes objetos. Segundo [12,36], todos os processos de prototipagem rápida podem ser classificados em sistemas baseados em líquidos, sólidos ou pós. Uma descrição e exemplos de sistemas que se enquadram nesta classificação são apresentadas a seguir.

2.4.1 Sistemas Baseados em Líquidos

Os sistemas de prototipagem rápida baseados em líquidos iniciam o processo com o material de construção no estado líquido. Durante um processo conhecido como “cura” o líquido é convertido para um estado sólido. A tabela 4 mostra os principais sistemas que se encaixam nesta categoria:

Tabela 4 - Sistemas de prototipagem rápida baseados em líquidos [12].

	Princípio de Fabricação	Nome Original do Sistema (Sigla)	Fornecedor / Desenvolvedor
01	Polimerização de resina líquida por meio de raio laser	Stereolithography Apparatus (SLA)	3D Systems – EUA
02		Soliform System	Teijin Seiki – Japão
03		Solid Creation System (SCS)	Sony – Japão
04		Solid Object U.V Laser Plotter (SOUP)	Mitsubishi – Japão
05		EOS Stereos System	EOS – Alemanha
06		Layer Modeling System (LMS)	Fockle & Schwarze – Alemanha
07		Computer-Operated, Laser-Active Modeling Machine (COLAMM)	Mitsui – Japão
08		Two Laser Beams	USA – Não comercializ.
09	Polimerização de resina líquida através máscara/lâmpada UV	Solid Ground Curing (SGC)	Cubital – Israel
10		Light Sculpting	USA – Não comercializado

2.4.2 Sistemas Baseados em Sólidos

Com exceção ao pó, os sistemas de prototipagem rápida baseados em sólidos abrangem todas as formas de materiais no estado sólido. Neste contexto, a forma de sólidos podem incluir fios, rolos, lâminas e grânulos. Os seguintes sistemas enquadram-se nesta classificação:

Tabela 5 - Sistemas de prototipagem rápida baseados em sólidos [12].

	Princípio de Fabricação	Nome Original do Sistema (Sigla)	Fornecedor / Desenvolvedor
01	Fabricação por corte + colagem de lâminas ou folhas	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Helisys – EUA
02		Selective Adhesive and Hot Press (SAHP)	Kira – Japão
03		Hot Plot	Sparx AB – Suécia
04		Rapid Prototype System	Kinergy – China
05		LaserCAMM	Scale Models Unlimited – USA
06	Fabricação por fusão e solidificação de fios ou grânulos	Fused Deposition Modeling (FDM)	Stratasys – USA
07		Model Maker MM6B	Sanders Prototype – USA
08		Multi-Jet Modeling System (MJM)	3D Systems – USA
09		Multiphase Jet Solidification (MJS)	Fraunhofer – Aleman.
10		Rapid Prototyping System (RPS)	IBM – USA

2.4.3 Sistemas Baseados em Pós

Em um sentido restrito, pós são partículas sólidas. Entretanto, esta foi intencionalmente criada como categoria aparte dos sistemas baseados em sólidos significando que os pós possuem dimensões muitas vezes menor que os grânulos, considerados sólidos. Os sistemas a seguir enquadram-se nesta classificação:

Tabela 6 - Sistemas de prototipagem rápida baseados em pós [12].

	PRINCÍPIO DE FABRICAÇÃO	NOME ORIGINAL DO SISTEMA (SIGLA)	FORNECEDOR / DESENVOLVEDOR
01	Sinterização de partículas por laser	Selective Laser Sintering (SLS)	DTM – EUA
02		EOSINT Systems	EOS – Alemanha
03	Uso de colas ou ligantes para juntar as partículas	Three-Dimensional Printing (3DP)	MIT – EUA
04		Ballistic Particle Manufacturing (BPM)	BPM – USA
05		Direct Shell Production Casting (DSPC)	Soligen

A próxima seção do trabalho apresenta uma breve descrição dos principais processos de prototipagem rápida utilizados para construir padrões de fundição para o processo de microfusão. Muitos destes sistemas baseiam-se nos mesmos princípios de fabricação, por isso, optou-se por não apresentar as características de cada sistema separadamente, mas sim, os princípios de fabricação em que estes estão baseados.

2.5 PRINCÍPIOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Diversos sistemas de prototipagem rápida são capazes de construir padrões de fundição que podem ser utilizados para fabricar protótipos metálicos através do processo de microfusão [20,37]. Todos estes sistemas partem de um modelo CAD tridimensional da peça. Este modelo é posicionado e orientado adequadamente e em seguida, a peça sólida é “fatiada” em múltiplas seções transversais formando as camadas de alguns décimos de milímetro, seguindo-se, então, a geração do programa de comando numérico que é transferido para o sistema de construção da peça [37]. A partir daí cada sistema possui um princípio particular de construir seus objetos físicos como será visto a seguir. Uma descrição mais detalhada sobre as características de todos estes sistemas de prototipagem rápida pode ser encontrada nas referências [2,11,12,14,23,27,28,37,50,66].

2.5.1 Polimerização de Resina Líquida por Raio Laser

Os sistemas de prototipagem rápida baseados neste princípio de fabricação utilizam resinas líquidas fotocuráveis como material para construção dos protótipos [2]. Existem diversos tipos de resina disponíveis, e sua seleção depende do tipo de laser disponível na máquina e das propriedades mecânicas requeridas pela peça [12].

Segundo JACOBS [36], os sistemas baseados neste princípio de fabricação são formados, basicamente, por um recipiente contendo uma resina líquida fotossensível, uma plataforma presa a um elevador, um sistema de nivelamento, um conjunto de espelhos galvanométricos e um canhão de raio laser. O desenho esquemático deste tipo de sistema é mostrado na figura 9.

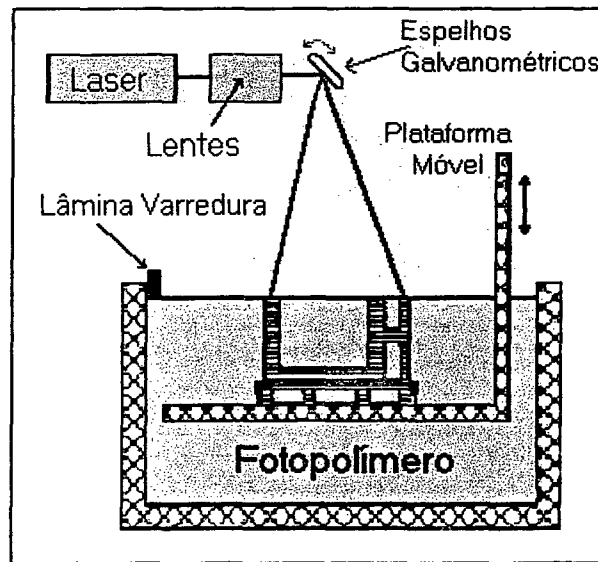


Figura 9 – Princípio de fabricação por polimerização de resina líquida através de raio laser

A construção da peça acontece na medida em que o equipamento vai fazendo a leitura dos dados relativos às camadas individuais e transmitindo ao sistema de controle dos espelhos. Conforme vai sendo atingida pela radiação ultravioleta, a resina se solidifica adquirindo o formato descrito por aquela camada específica do desenho [2,12,36].

Depois que uma camada é traçada, a plataforma é abaixada para dentro do reservatório para permitir que a resina líquida cubra a última camada solidificada. A plataforma, então, sobe para um nível que corresponde a espessura da próxima camada e uma “lâmina de varredura” move-se sobre a peça presa à plataforma removendo o menisco criado pela tensão superficial da resina. Um tempo é reservado para que a superfície da resina se estabilize e uma nova camada é solidificada [12,36].

A operação se repete, camada após camada, até que toda a peça seja completada. Após o término da construção, o elevador levanta a plataforma retirando a peça do reservatório e permitindo que o excesso de resina seja drenado [12]. Depois de retiradas da máquina, as peças, geralmente, são enviadas para uma etapa de pós-processamento. Isto inclui a limpeza da peça para retirada do excesso de resina, cura adicional em radiação ultravioleta e operações de acabamento superficial compreendendo lixamento, polimento, jateamento de areia, pintura, etc [36].

MATERIAIS UTILIZADOS

Os processos baseados na polimerização de resinas líquidas por raio laser são bastante limitados em relação à variedade de materiais que podem ser utilizados. Estão disponíveis resinas epóxi e acrílicas, que são materiais fotossensíveis que polimerizam sob incidência de um raio laser com comprimento de onda e potência específicos. Existem diversos tipos de resinas com propriedades físicas diferentes, sendo algumas flexíveis e macias, outras mais rígidas e frágeis. Porém esta é uma grande limitação dos sistemas que utilizam este princípio de fabricação [12].

PARÂMETROS IMPORTANTES

Segundo CHUA e LEONG [12], os parâmetros que mais influenciam a performance deste processo são: tipo da resina, velocidade e potência do laser, diâmetro do feixe de laser, estilo de construção, espessura de camada e viscosidade da resina.

2.5.2 Polimerização de Resina Líquida Utilizando Máscara / Lâmpada U.V

Por este processo, as peças são construídas, camada por camada, a partir de uma resina líquida fotossensível que solidifica quando exposta à luz ultravioleta. O processo de fotopolimerização é semelhante ao descrito no item 2.5.1, exceto que a fonte de radiação é uma lâmpada ultravioleta de alta potência e a seção transversal de cada camada é gerada pela iluminação da máscara ao invés da varredura óptica pelo feixe de raio laser [12].

Uma máscara é criada a partir dos dados CAD e “impressa” em um substrato transparente por um processo de impressão ionográfica [37], um processo similar ao utilizado em máquinas fotocopadoras e impressoras a laser. A imagem é formada pela deposição de toner que adere ao substrato eletrostaticamente (ver figura 10). Isto é usado formar a máscara que será iluminada pela luz U.V. Após a exposição, o toner é eletrostaticamente removido do substrato que pode ser usado novamente como padrão para a próxima camada [37].

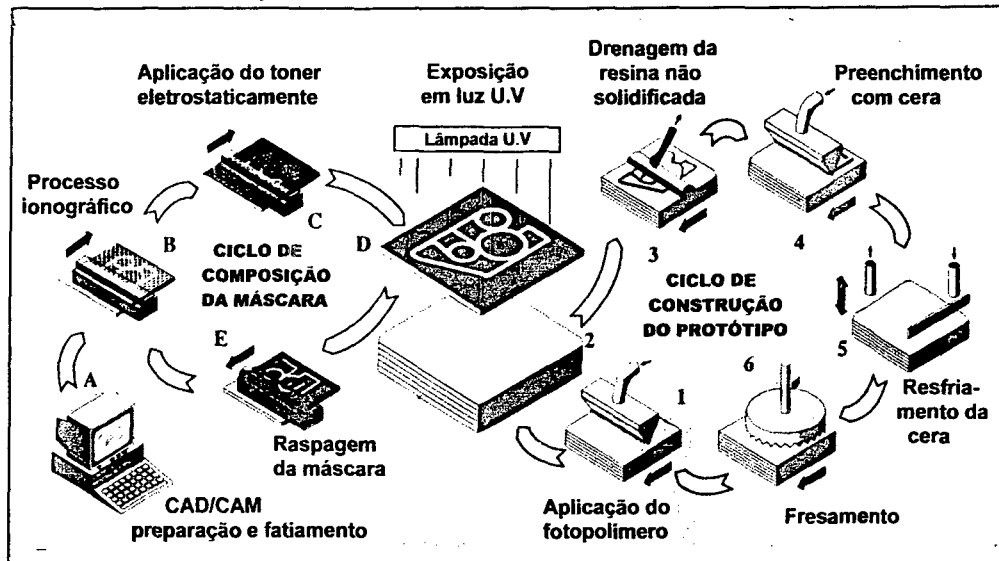


Figura 10 – Princípio de fabricação por polimerização de resina líquida utilizando máscara / lâmpada de ultravioleta

Depois de completar a polimerização de uma camada, a resina não solidificada é drenada e estes espaços são preenchidos com cera, que serve como uma estrutura de suporte para regiões suspensas da peça, tendo a função de reduzir as distorções na peça. Cada camada de resina polimerizada é fresada permitindo se obter a espessura de camada desejada, permitindo um controle total da precisão vertical [47]. Depois que toda a peça foi construída, a cera é removida usando ar quente, microondas ou algum solvente.

MATERIAIS UTILIZADOS

Os processos baseados neste princípio de funcionamento utilizam, basicamente, os mesmos materiais do processo anterior, ou seja, resinas fotocuráveis [12].

PARÂMETROS IMPORTANTES

De acordo com a referência [12], os parâmetros que mais influenciam a performance e funcionalidade das peças fabricadas por este processo são o tempo de exposição para cura completa da resina fotossensível e a potência da lâmpada U.V.

2.5.3 Fabricação por Corte e Colagem de Lâminas ou Folhas

Um outro princípio de fabricação baseado na ação de laser, capaz de construir objetos sólidos tridimensionais, baseia-se na adesão de folhas de papel ou outros materiais, que são cortados por meio da ação de um laser de CO₂ [27,37]. Na figura 11 está

representado esquematicamente os principais componentes de um sistema que utiliza o princípio de fabricação por corte e colagem de folhas.

Da mesma forma que os processos já descritos, este inicia-se com a disponibilidade do desenho geométrico 3D da peça a ser prototipada e o posterior fatiamento em camadas de espessura igual a do material a ser utilizado (folhas de papel, cerâmica ou cera), com a geração do programa de comando numérico para cada camada [27]. As espessuras das folhas variam entre 0.05 e 0.25 mm.

De acordo com FEYGIN [27], o processo funciona da seguinte maneira: inicialmente posiciona-se o papel sobre a plataforma móvel. Em seguida um rolo de laminação aquecido passa sobre a folha com uma pressão específica fundindo as camadas de material adesivo que envolve as folhas, permitindo a adesão das mesmas. Então o feixe de laser recorta o contorno da seção transversal da peça e o material restante é cortado em forma de haçhura, conforme mostrado na figura 11.

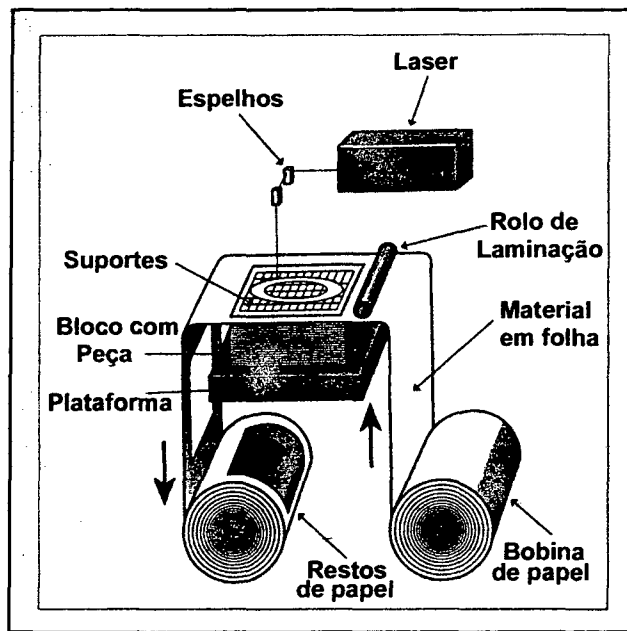


Figura 11 – Princípio de funcionamento do processo de manufatura por corte e colagem de lâminas ou folhas

Em seguida, a plataforma desce para que nova camada seja adicionada. Este processo se repete até que a última camada seja adicionada. Finalmente, retiram-se os suportes (parte hachurada do bloco) e a peça está pronta para receber acabamentos posteriores, incluindo jateamento em areia, polimento, pinturas, etc. [12,27]. Depois que as peças estão prontas, recomenda-se que sejam imediatamente protegidas ou seladas usando *sprays* de uretanos, epóxi ou silicone para prevenir contra a absorção de umidade.

MATERIAIS UTILIZADOS

Potencialmente, qualquer material em forma de folha coberto com um adesivo pode ser utilizado. Pesquisas demonstram que plásticos, metais e mesmo cerâmicas podem ser usados [12]. Entretanto, o material mais popular tem sido um papel com um selo adesivo sensível ao calor à base de polietileno.

PARÂMETROS IMPORTANTES

Os parâmetros que influenciam a performance e funcionalidade das peças são a consistência e espessura do material da folha, a potência do laser usado, a velocidade de movimentação do laser, a pressão de laminação, as temperaturas da câmara e dos rolos e a velocidade dos rolos [12].

2.5.4 Fabricação por Fusão e Solidificação de Fios ou Grânulos

Em essência, as técnicas baseadas na fusão e solidificação de materiais fundamentam-se na extrusão de um filamento ou grânulos de material plástico, que são alimentados automaticamente, sendo o movimento do cabeçote de extrusão controlado por computador [14].

Da mesma maneira que os outros princípios, esta inicia-se a partir de um modelo 3D sólido ou em superfície, o qual é fatiado em camadas com espessuras variando entre 0.051mm e 0.762mm. Para construir o modelo, um filamento termoplástico é continuamente alimentado através de um cabeçote extrusor controlado eletronicamente no plano XY como mostrado na figura 12 [12].

O material plástico é aquecido até um estado semi-líquido, quando então, é extrudado pelo cabeçote e depositado em camadas muito finas, uma de cada vez. Como o ar em volta do cabeçote é mantido a uma temperatura inferior ao ponto de fusão do material, este solidifica-se rapidamente. Movendo-se no plano XY, o cabeçote segue o caminho gerado pelo programa de comando numérico, gerando a camada desejada. Após a construção da camada, o cabeçote extrusor sobe e uma nova camada é construída. O processo se repete até que a última seja depositada [14].

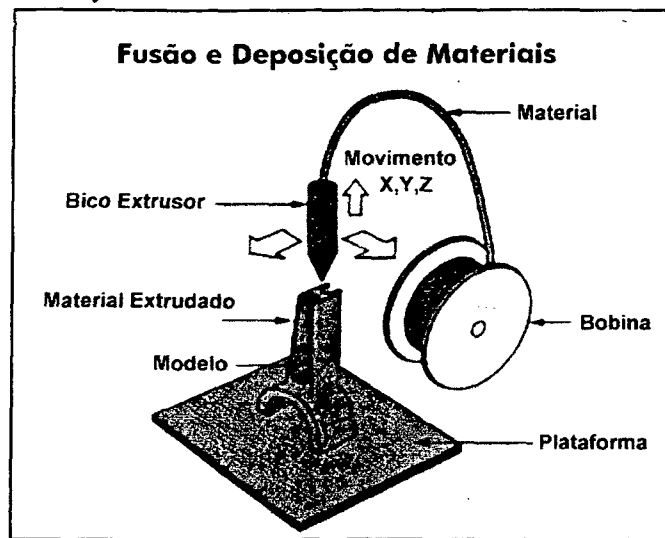


Figura 12 – Princípio de funcionamento do processo de fabricação por fusão e solidificação de fios ou grânulos

Alguns sistemas utilizam dois materiais para construir um protótipo. Um material primário que é o material que formará o protótipo e um material secundário, ou material de “liberação”, que é usado para produzir os suportes. O material dos suportes forma uma ligação com o material principal de tal forma que, quando uma pequena força é aplicada sob estes suportes, o material quebra facilmente devido a sua natureza frágil [14].

MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais que podem ser usados com este processo de prototipagem incluem formulações de cera para o processo de microfusão, ABS, polipropileno, elastômeros entre outros [12].

PARÂMETROS IMPORTANTES

Os parâmetros que afetam a performance e funcionalidade deste sistema são: o módulo de flexão e a viscosidade do material, a precisão de posicionamento, a velocidade de deposição, a taxa de fluxo volumétrica, o diâmetro do cabeçote, a temperatura de operação e a geometria da peça [12].

2.5.5 Sinterização de Partículas por Raio Laser

Um outro princípio de fabricação usado para produzir modelos para o processo de microfusão é a sinterização de partículas por laser. Este processo é semelhante ao descrito no item 2.5.1, pois também utiliza como fonte de energia o laser para fabricação das peças camada por camada, no entanto, utiliza pós como material de construção das peças [37].

De acordo com [23], o processo mostrado esquematicamente na figura 13 inicia-se com o modelo CAD 3D da peça a ser construída. Este modelo é posicionado e orientado adequadamente e fatiado em seções transversais formando as camadas da peça.

Um laser estacionário, através da deflexão dos espelhos, dirige o feixe traçando a seção transversal da peça para aquela camada. O material termoplástico numa temperatura relativamente alta é momentaneamente aquecido e amolecido pelo laser a ponto de, apenas no local onde o laser atuou, soldar ou sinterizar as partículas [6,23].

Terminada uma camada, a plataforma e a peça descem o equivalente a espessura da próxima camada para permitir que o rolete de deposição (figura 13) adicione uma nova camada de pó do material selecionado. Novamente o laser incide sobre a camada de pó “desenhando” a próxima seção transversal da peça. Este processo se repete para que a nova camada se funda a anterior. No final a peça é removida e o material não solidificado é retirado, restando, à peça, receber os acabamentos finais como polimento, jateamento de areia e pintura, dependendo do aplicação do protótipo construído [23].

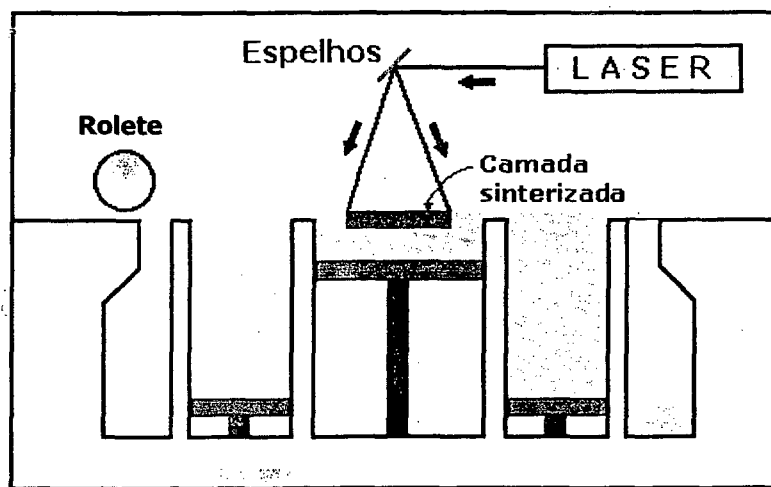


Figura 13 - Princípio de funcionamento do processo de sinterização de partículas por raio laser [58]

MATERIAIS UTILIZADOS

Os processos baseados no princípio de sinterização de partículas por laser não são limitados à uma classe específica de materiais. Na teoria, uma ampla variedade de materiais termoplásticos, compósitos, cerâmicas e metais podem ser usados com este processo. Esta é das vantagens deste processo: fornecer flexibilidade nos materiais usados para prototipagem. Os principais tipos de materiais usados neste processo são [6,12,23]: formulações de cera para fundição usadas como material para construção dos padrões de fundição, polímeros tanto termoplásticos quanto termofixos como policarbonato, ABS,

nylon, que são plásticos tradicionais de engenharia, e pós metálicos onde um material muito utilizado é uma matriz aço/cobre que é utilizada para produzir diretamente insertos de cavidades usados em moldes para o processo de moldagem por injeção. Este material apresenta propriedades superiores às do alumínio 7075 e é resistente o suficiente para produzir mais de 50.000 peças [12].

As referências [6,12,23,28,35,50] fornecem uma discussão sobre o processo de sinterização das partículas de pós, bem como estudos de caso realizados.

PARÂMETROS IMPORTANTES

Os parâmetros que influenciam a performance deste sistema são os seguintes [12,23]: granulometria das partículas de pó, velocidade e potência do laser, propriedades físicas dos materiais como calor específico, ponto de fusão e solidificação, espessura de camada, existência de atmosfera inerte, taxa de resfriamento, entre outros.

2.5.6 Uso de Colas ou Ligantes para Juntar Partículas

Os processos baseados neste princípio de fabricação produzem objetos físicos através da união de partículas por ligantes, baseados nos dados de fatiamento da seção transversal [12]. Este princípio de funcionamento é mostrado, esquematicamente, na figura 14.

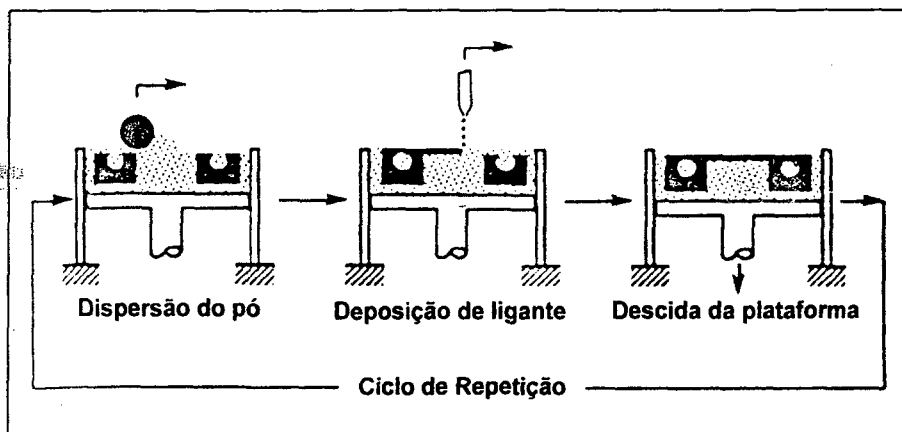


Figura 14 - Princípio de fabricação por união de partículas por colas ou ligantes

Inicialmente uma fina camada de pó é espalhada sobre a superfície da plataforma. Usando uma tecnologia similar à impressão por jato de tinta, o material ligante é injetado sobre a superfície do pó, que é seletivamente unido onde o objeto deve ser formado. A plataforma, então, abaixa para que uma nova camada de pó seja adicionada e seletivamente

unida [12]. Este processo, camada por camada, se repete até que toda a peça seja construída.

Depois de completada a peça, dependendo do material que foi utilizado, a peça “verde” pode sofrer um processo de sinterização para eliminar o polímero ligante por decomposição térmica e sinterizar as partículas de pó metálico ou cerâmico [25,37].

A densidade de empacotamento das partículas de pó influencia no processo da colagem, que por sua vez afeta as propriedades mecânicas da peça. Similarmente ao processo de sinterização de partículas por laser, as densidades resultantes nas peças variam de 50% a 62% [51]. Quando uma gota de ligante cai sobre a camada de pó, ela forma um agregado esférico de ligante e partículas de pó. As forças de capilaridade produzem agregados adjacentes, incluindo os da camada anterior. Isto formará uma rede sólida que resultará no objeto físico.

MATERIAIS UTILIZADOS

Podem ser usados com estes processos materiais termoplásticos em geral, composições de cera para fundição, materiais metálicos incluindo a maioria dos aços, ligas com tungstênio, cromo, níquel, entre outros, além de compósitos cerâmicos e metal/cerâmico em forma de pós [12].

PARÂMETROS IMPORTANTES

Os parâmetros que influenciam a performance e funções deste processo são as propriedades das partículas de pó, o tamanho destas partículas, o material ligante utilizado, a precisão de posicionamento XY da plataforma e o controle no eixo Z [12]

2.6 APLICAÇÕES DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA MANUFATURA

As áreas de aplicação estão relacionadas aos propósitos da prototipagem rápida e aos materiais utilizados. Assim, quanto mais próximos os materiais de prototipagem estiverem dos tradicionais materiais de engenharia, maior será o alcance das aplicações [79]. Estas áreas de aplicação são sumarizadas na figura 15 e descritas nas seções 2.6.1 a 2.6.4, segundo STARKEY [75]:

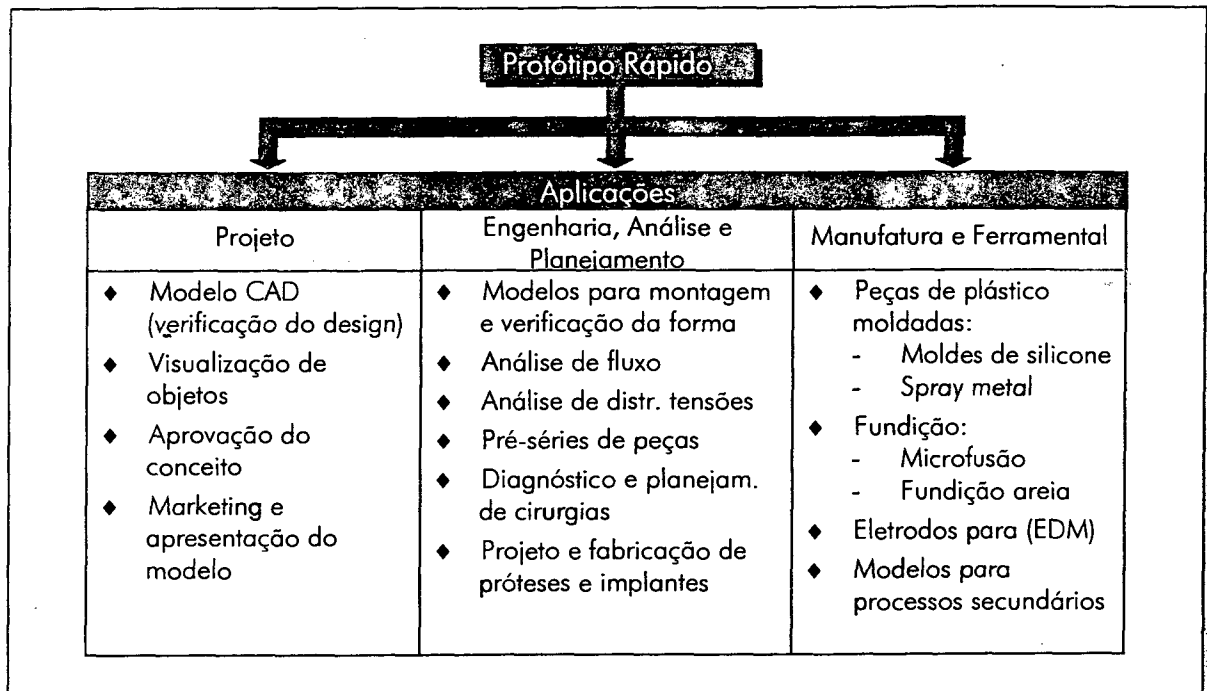


Figura 15 - Principais aplicações dos processos de prototipagem rápida[75]

2.6.1 Aplicações no Projeto

VERIFICAÇÃO DO MODELO CAD

Este foi o objetivo inicial e a grande força dos sistemas de prototipagem rápida, onde os projetistas freqüentemente necessitam de peças físicas para confirmar o *design* que eles criaram nos sistemas CAD. Isto é importante, especialmente, para produtos com funções estéticas ou ergonômicas.

VISUALIZAÇÃO DE OBJETOS

Projetos criados em sistemas CAD precisam ser comunicados não somente entre os projetistas, mas também para pessoas de outros departamentos, como manufatura e *marketing*, por exemplo. Assim, existe a necessidade de criar objetos físicos a partir do CAD para a visualização e compreensão para que todos façam referência ao mesmo objeto.

APROVAÇÃO DO CONCEITO

A aprovação de um conceito está relacionada à adaptação de detalhes específicos a um objeto, ambiente ou aspectos estéticos. Também refere-se à aprovação da performance funcional ou ergométrica da peça ao propósito desejado.

MARKETING E APRESENTAÇÃO DO MODELO

Freqüentemente, o departamento de *marketing* solicita um modelo físico para apresentação e avaliação. O modelo ou *mock-up* pode até mesmo ser usado para produzir *folders* de promoção, mesmo antes do produto estar disponível.

2.6.2 Aplicações em Engenharia, Análise e Planejamento

Além da criação de modelos físicos para propósitos de visualização e verificação, os projetistas estão interessados em aspectos de engenharia em seus projetos. As tecnologias de prototipagem rápida tornam-se importantes quando elas podem fornecer informações necessárias para assegurar que o produto não falhará quando ele estiver nas mãos do consumidor.

VERIFICAÇÃO DA FORMA E MONTAGEM

Além das dimensões e volumes, as formas devem ser consideradas do ponto de vista estético e funcional. A maneira como uma peça pode ser montada e sua relação com as demais são aspectos importantes a serem observados.

ANÁLISE DE FLUXO

Projetos de produtos usados em testes de fluxo de ar, água ou outro fluido que são fabricados tradicionalmente não podem ser facilmente modificados e adaptados para testes reais. Mas se houver a possibilidade de se obter rapidamente um objeto físico diretamente a partir de arquivos CAD 3D, testes específicos podem ser realizados e modificações podem ser feitas para melhorar as características de um escoamento.

ANÁLISE DE TENSÕES E FADIGA

Para a análise de tensões usando métodos foto-ópticos, réplicas físicas do objeto são necessárias. Se as propriedades dos materiais dos protótipos são similares às das peças de produção, elas podem ser usadas juntamente com métodos analíticos para determinação da distribuição de tensões no produto.

PRÉ-PRODUÇÃO DE PEÇAS

Em casos onde a produção em massa será introduzida, um lote piloto de 10 ou mais produtos é usual. A produção de peças-piloto é usada especialmente para preparações e ajustes no processo mais adiante. Muitos sistemas de prototipagem rápida são capazes de produzir rapidamente lotes-piloto ajudando a encurtar o tempo de desenvolvimento e lançamento de novos produtos.

PROJETO E FABRICAÇÃO DE PRÓTESES E IMPLANTES PERSONALIZADOS

Modelos de prototipagem rápida podem ser também construídos a partir de dados gerados por equipamentos de tomografia computadorizada para criar réplicas exatas de partes do corpo para projeto e fabricação de próteses e implantes.

2.6.3 Aplicações na Manufatura e Fabricação de Ferramentas

FABRICAÇÃO DE PEQUENOS LOTES DE PEÇAS (*RAPID MANUFACTURING*)

Muitas vezes, o volume de produção de um componente não é suficientemente alto a ponto de justificar a construção de moldes de aço para alta produção. Neste caso, a produção de um lote limitado de peças por prototipagem rápida pode ser viável. Para isso, os protótipos devem ter as mesmas propriedades e durabilidade exigidas pela peça de produção.

INJEÇÃO EM MOLDES DE SILICONE

Moldagem por injeção em moldes de silicone é um processo rápido usado para criar múltiplas cópias de um componente. Os objetos produzidos por prototipagem podem ser usados como modelos para criação dos moldes de silicone e, subsequentemente, das peças de poliuretano injetadas. Uma breve explicação deste processo encontra-se em [5,14].

MÉTODOS DE FABRICAÇÃO RÁPIDA DE FERRAMENTAS (*RAPID TOOLING*)

Existem diversos métodos usados para fabricação rápida de ferramentas por meio da prototipagem rápida. Com eles é possível criar um molde de injeção que pode ser usado para injetar um número limitado de peças. Dois objetivos principais destes métodos são: a aprovação do ferramental e o planejamento do processo. A aprovação do ferramental refere-se a construir ferramentas corretas para que mudanças futuras não sejam necessárias. Planejar o processo significa projetar um produto para adequar-se à fabricação e montagem com base nos protótipos produzidos.

PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

No processo tradicional de fundição, um metal, usualmente uma liga, é aquecida até fundir e é derramada no interior de um molde que contém a cavidade. A cavidade terá a forma do componente que se pretende obter. Modelos de prototipagem rápida funcionam como modelos para criação destas cavidades. Existem diversos procedimentos de fundição, incluindo fundição em areia, fundição em molde permanente e microfusão. Este último, o processo de microfusão que utiliza padrões de fundição construídos por SL será estudado com mais detalhes no capítulo III.

FABRICAÇÃO DE ELETRODOS

Um método que tem sido testado em laboratórios de pesquisa, mas ainda não é amplamente aplicado pela indústria é a possibilidade de fabricar eletrodos de cobre para o processo de eletroerosão por penetração usando tecnologias de prototipagem rápida. Diversos métodos podem ser utilizados para criar um eletrodo. Um deles é usando o processo SLS que é capaz de produzir, diretamente, eletrodos de cobre.

2.7 APLICAÇÕES EM FERRAMENTAL RÁPIDO

O valor de se ter um modelo físico para tocar, sentir e ver é claro. Um protótipo de uma peça permite que o projetista verifique as decisões de projeto e encontre erros antes de iniciar a construção do ferramental [37]. Para estas aplicações, o valor da prototipagem rápida já é bem conhecido e amplamente dominado. Entretanto, pode-se pensar: se é possível gerar o ‘positivo’ de um objeto, então, a princípio, também deveria ser possível gerar o ‘negativo’ daquele mesmo objeto. Este ‘negativo’ é que será considerado a base do ferramental QuickCast™ [37], sendo um dos assuntos principais a serem discutidos neste trabalho.

Com o surgimento das modernas técnicas de prototipagem rápida, as empresas vêm conseguindo uma notável redução no tempo de desenvolvimento de seus componentes, porém, suas aplicações industriais ainda são limitadas pela necessidade de produção do ferramental. As mudanças no mercado de fabricação de ferramentas atualmente têm mostrado um crescimento na demanda por moldes para injeção de plásticos e borracha [43,67]. O potencial das tecnologias de prototipagem rápida em relação à produção de ferramentas é muito grande sendo esta a área de aplicação que mais tem crescido e merecido atenção por parte das indústrias e dos pesquisadores nos últimos anos [82].

O conceito de *rapid tooling* ou ferramental rápido baseia-se na aplicação ou utilização das tecnologias de prototipagem rápida em alguma fase do processo de fabricação da ferramenta [80]. Estas ferramentas rápidas são usadas, tipicamente, para a produção de pequenas séries de peças (em geral de 50 a 200 peças). Algumas técnicas permitem a produção de centenas e até mesmo milhares de peças injetadas dependendo do material da ferramenta, do processo utilizado para fabricar a ferramenta e das condições de injeção utilizadas [80]. Uma destas técnicas de *rapid tooling* e que será abordada neste trabalho é baseada no processo de microfusão a partir do uso de padrões QuickCast™ e será denominada *QuickCast Tooling*.

2.7.1 Classificação das Técnicas de Rapid Tooling

Mais de 20 técnicas diferentes de *rapid tooling* foram desenvolvidas e têm sido anunciadas até o presente momento. Cada uma delas oferece um conjunto único de qualidades e limitações que tipicamente servem a um nicho de aplicações, apesar de que poucas delas são prontamente utilizadas de maneira comercial [80]. A maioria destes métodos é relativamente nova, embora nem todos sejam. Moldes de silicone, 3D KelTool e moldes de epóxi preenchidos com alumínio estão disponíveis há mais de vinte anos, entretanto, a rápida produção dos padrões de prototipagem rápida tem tornado estes processos mais viáveis hoje, pois todos estes métodos são baseados em padrões ou modelos [70,82].

Diversas classificações podem ser encontradas na literatura para agrupar as técnicas de *rapid tooling* [12,37,67,80]. Dentre estas classificações, as duas mais amplamente utilizadas são:

- (1) a que baseia-se no método de construção da ferramenta - *método direto ou método indireto* e
- (2) uma outra baseada na quantidade de peças que se pode fabricar utilizando o ferramental rápido: *soft tooling, bridge tooling e hard tooling*.

CLASSIFICAÇÃO BASEADA NO MÉTODO DE CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA

➤ Método Direto

O processo direto (figura 16) envolve a construção dos moldes ou insertos diretamente pelo equipamento de prototipagem rápida, ou seja, o resultado ou produto fabricado pelo sistema de prototipagem rápida é a própria ferramenta [80].

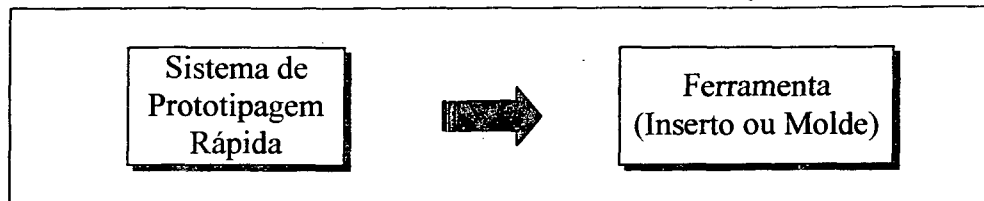


Figura 16 - Método direto de construção de ferramentas

Exemplos de técnicas de *rapid tooling* baseados no método direto segundo WOHLERS [80] são: **Direct AIM™**, **RapidTool™**, **RapidSteel™**, **Direct Metal Laser Sintering (DMLS™)**, **ProMetal™**, **Laminated Tooling**, etc.

➤ Método Indireto

O método indireto (figura 17) envolve a construção de um **modelo** usando um sistema de prototipagem rápida que será usado por um processo secundário para criar a ferramenta definitiva [80].

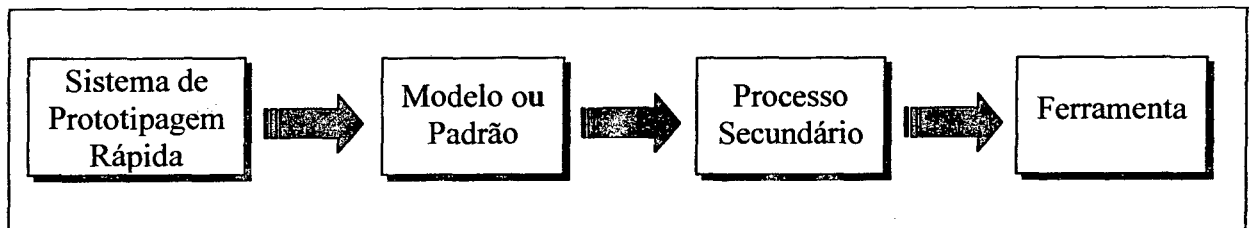


Figura 17 - Método indireto de construção de ferramentas

Exemplos de técnicas de *rapid tooling* baseadas no método indireto segundo WOHLERS [80] são: **QuickCast Tooling**, **3D Keltool™**, **Aluminum-filled epoxy**, **moldes de silicone**, **Spray Metal Tooling**, **PolySteel™**, **CEMCOM tooling™**, **Express Tool™**, **SwiftTool™**, **PHAST™**, entre outros.

CLASSIFICAÇÃO DA FERRAMENTA BASEADA NA QUANTIDADE DE PEÇAS PRODUZIDAS

➤ Soft Tooling

É um tipo de ferramental capaz de produzir, em média, de 20 a 50 peças até que a vida da ferramenta chegue ao fim [12]. Exemplos deste tipo de ferramental são: **Moldes de silicone**, **PHAST™**, **PolySteel™**, **SwiftTool™**.

➤ **Bridge ou Firm Tooling**

Este tipo de ferramental caracteriza-se pela capacidade de produzir de 50 à mais de 1.000 peças, dependendo do material injetado e das condições de injeção [12]. Nesta categoria situam-se a maioria das técnicas de *rapid tooling* como: Direct AIM™, moldes de epóxi preenchidos com alumínio, moldes fabricados com spray de metal, RapidSteel™, DMLS™, entre outros.

➤ **Hard Tooling**

As ferramentas classificadas como *hard tooling* são capazes de produzir, tipicamente, lotes que variam de 1.000 à mais de 50.000 peças dependendo do material injetado e das condições de injeção [12]. Nesta categoria estão as técnicas 3D Keltool™ e o QuickCast tooling.

2.7.2 Método de Fabricação do Ferramental QuickCast™

O método de fabricação do ferramental QuickCast™ constitui um **método indireto** de construção de ferramentas, ou seja, necessita de um modelo (construído pela técnica de estereolitografia), o qual é utilizado por um processo secundário (no caso o processo de microfusão), para finalmente chegar-se à ferramenta definitiva.

Este método permite a fabricação de insertos para moldes de injeção de plástico capazes de produzir milhares ou mesmo dezenas de milhares de peças injetadas, por isso é classificado como uma técnica *hard tooling*.

O conceito da técnica de *rapid tooling* a ser aplicada nesta pesquisa consiste, basicamente, nas seguintes etapas principais [38]:

- Projetar a peça (positivo) que se pretende injetar no molde a ser fabricado, modelando-a em um software de CAD com modelador de sólidos ou de superfícies.
- Construir a peça (positivo do objeto) usando a técnica de estereolitografia.
- Verificar e iterar o projeto da peça até que todos os requisitos de projeto e de estética tenham sido satisfeitos.
- Selecionar o material do inserto (alumínio, aço-ferramenta, A6, A2, P20, etc).
- Estabelecer os fatores de compensação para a contração considerando: (1) a contração do fotopolímero (padrão *QuickCast*), (2) a contração do metal a ser fundido e (3) a contração do material plástico a ser injetado.

- Utilizando um software de CAD, gerar as cavidades ou 'negativo' da peça no interior de um bloco com as dimensões externas dos insertos.
- Selecionar a linha de partição de forma a dividir o negativo do objeto em duas partes (macho + fêmea) e estabelecer os locais para pinos extratores, canais de refrigeração, pontos de injeção, etc.
- Construir os padrões QuickCast™ para os insertos macho e fêmea na máquina de estereolitografia.
- Preparar os padrões QuickCast™ dos insertos para o processo de microfusão (acabamento superficial, fechamento de drenos e respiros).
- Através do processo de microfusão, obter os insertos macho e cavidade no material requerido.
- Enviar os insertos metálicos para uma ferramentaria para usinagem final, polimento e montagem no porta moldes.
- Executar os ensaios de injeção utilizando o polímero selecionado.

Os procedimentos anteriormente descritos podem parecer consumir muito tempo, entretanto, a maioria dos passos acima listados podem ser realizados de maneira bastante rápida e direta [38].

O próximo capítulo abordará os aspectos construtivos e de comportamento dos padrões de estereolitografia destinados ao processo de microfusão.

**Considerações sobre Padrões de Estereolitografia
para Microfusão****3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Microfusão e prototipagem rápida têm um potencial enorme, pois, ambas as técnicas destinam-se à produção de peças complexas [10,35]. Nos últimos oito anos, muitos sistemas de prototipagem rápida tornaram-se disponíveis. Todos eles oferecendo, como vantagem, um atalho para a produção de padrões de fundição para pequenos lotes de peças, sem a necessidade de projetar e produzir o ferramental necessário. Sempre que tais técnicas sejam viáveis, os ganhos em custos e economia de tempo podem ser substanciais [10].

Os padrões obtidos por técnicas de prototipagem rápida têm permitido à indústria de fundição uma nova capacidade de suprir as necessidades de seus consumidores entregando, rapidamente, protótipos metálicos funcionais [37]. As capacidades dos modelos sólidos CAD, acoplados às máquinas de prototipagem rápida, têm possibilitado que um maior número de operações de fabricação sejam executadas e aperfeiçoadas em um cenário virtual ao invés de real. Como a imagem de um item a ser produzido é descrita de forma digital, a empresa de fundição tem a capacidade de executar operações suplementares, como por exemplo, a análise térmica para colocação de pontos de injeção, ou mesmo eventuais incorporações de sistemas de alimentação completos em peças individuais e a colocação destas peças na árvore é uma característica comum num cenário virtual [37].

Para que estas vantagens sejam aproveitadas as seguintes considerações devem ser avaliadas [37]:

1. Os padrões de fundição devem ser precisos o suficiente para acomodar as tolerâncias do processo de microfusão.
2. O método utilizado deve obter um alto rendimento no processo de microfusão para que o potencial de economia seja realmente alcançado.
3. Os fundidos resultantes devem possuir boas propriedades metalúrgicas.
4. Todas as etapas do processo de fabricação de protótipos metálicos utilizando padrões de prototipagem rápida devem ser suficientemente rápidas para se atingir a economia de tempo prometida.

A seguir é apresentada uma descrição das etapas gerais do processo “tradicional” de microfusão visando permitir que se tenha uma noção mais ampla sobre os processos envolvidos, além de servir de base para futuras comparações e avaliações envolvendo o uso de tecnologias de prototipagem rápida.

3.2 O PROCESSO TRADICIONAL DE MICROFUSÃO

O processo de microfusão ou *investment casting* é um processo de fabricação onde um metal é fundido e aquecido até uma temperatura adequada, quando, então, é vazado para o interior de um molde cerâmico que contém a forma da peça a ser fabricada [5,33,40,56,63,78]. Durante o resfriamento do metal, este se solidifica tomando a forma da cavidade. Através deste processo é possível fabricar peças metálicas, com formas geométricas complexas, em uma ampla variedade de metais e ligas metálicas, além de requererem um processamento mínimo em termos de acabamento superficial [5,56].

Segundo KENNERKNECH e SARKIS [48], o processo de microfusão começa com os requisitos do consumidor para a peça desejada. Um engenheiro ou projetista, baseado em tais requisitos, desenvolve um conjunto de especificações de projeto para a peça. Estas especificações são enviadas para uma microfundição e para o fabricante do molde que irá projetar e construir a ferramenta que será utilizada na produção dos padrões de cera usados no processo. A ferramenta é usualmente fabricada em aço ou alumínio, dependendo da quantidade de peças a serem produzidas.

Em geral, oito etapas são utilizadas para fabricar peças pelo processo de micro fusão [5,63,78], conforme descrito a seguir:

3.2.1 Etapas do Processo Tradicional de Microfusão

3.2.1.1 INJEÇÃO DOS PADRÕES DE CERA

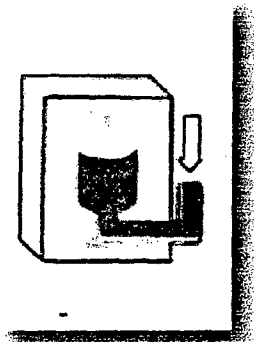


Figura 18 - Injeção dos padrões de cera

O processo de fabricação por micro fusão requer um padrão para cada peça a ser fundida. Estes padrões são normalmente feitos de cera ou de plástico e são injetados em um molde metálico. A cavidade do molde contém a forma exata da peça a ser fabricada, porém, deve considerar uma compensação dimensional devido a contração da cera no processo de injeção, e do metal no processo de fundição.

A contração total da peça fundida acabada em relação à cavidade é de aproximadamente 2% dependendo da liga metálica e do processo de moldagem utilizado.

3.2.1.2 MONTAGEM DOS PADRÕES DE CERA NA ÁRVORE

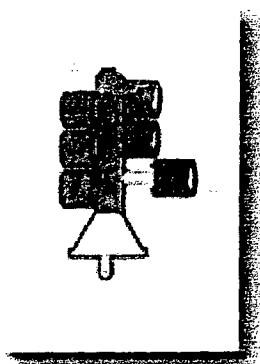


Figura 19 - Montagem dos padrões de cera na árvore

Uma vez obtidos os padrões de cera, estes são montados em uma estrutura que, futuramente, formará o sistema de alimentação de metal para cada cavidade individualmente. Os padrões individuais são montados neste tipo de estrutura por duas razões principais: (1) para possibilitar que um maior número de peças seja manipulado, formando um lote econômico, (2) para fornecer um sistema de canais de alimentação que permitirá que o metal fundido flua para cada uma das cavidades que dará origem a uma peça fundida.

3.2.1.3 COMPOSIÇÃO DA CASCA CERÂMICA

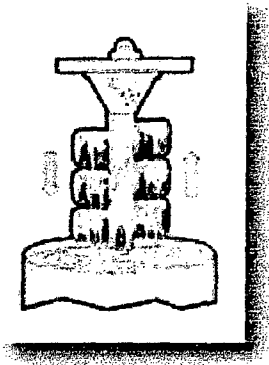


Figura 20 - Composição da casca cerâmica

Finalizada a montagem da árvore, inicia-se a etapa de construção do molde cerâmico. Nesta etapa a montagem árvore/padrões de cera é mergulhada em um material de pré-cobrimento (uma suspensão líquida contendo um material refratário) que será, subseqüentemente, recoberta com uma camada de pó cerâmico (geralmente uma composição de sílica e zirconita) que adere à suspensão previamente aplicada, formando um invólucro muito resistente. O conjunto é então colocado em uma estufa, com temperatura e umidade controladas, para permitir a secagem do material refratário. Este ciclo de secagem, usualmente, consome de 6 a 8 horas. Depois que a primeira cobertura foi aplicada, outras camadas são adicionadas usando a suspensão cerâmica (material de pré-cobrimento) e pós refratários, com tamanhos de grão sucessivamente maiores, para a composição da casca cerâmica final.

A quantidade de camadas a serem adicionadas depende da taxa de resfriamento requerida e das propriedades metalúrgicas pretendidas, ou até que a casca cerâmica atinja uma espessura suficiente para resistir às tensões térmicas nas etapas subseqüentes. Normalmente o molde cerâmico é construído com 6 a 10 camadas, atingindo uma espessura de aproximadamente 10 mm.

Para produzir um bom acabamento superficial nas peças fundidas, a primeira camada é composta de partículas muito finas de material refratário, enquanto que as camadas subseqüentes utilizam partículas de granulometrias gradativamente maiores visando aumentar rapidamente a espessura da casca e fornecer maior resistência.

3.2.1.4 REMOÇÃO DOS CANAIS E PADRÕES DE CERA EM AUTOCLAVE

Depois que a casca cerâmica atingiu a espessura desejada, a cera proveniente dos padrões e da árvore de cera deve ser extraída do interior do molde cerâmico. Isto é feito colocando-se a montagem árvore-padrões em uma autoclave a vapor com uma temperatura de operação podendo variar de 120°C a 150°C e pressão de 5 a 7 bar, dependendo do comportamento de fusão/expansão da cera e da resistência da casca cerâmica.

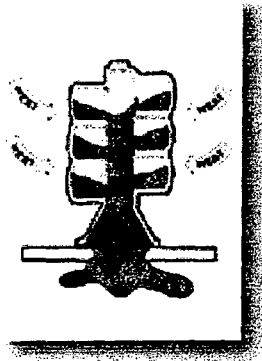


Figura 21 - Remoção dos canais e padrões de cera em autoclave

A cera extraída pode ser reaproveitada e utilizada para moldagem dos canais de alimentação.

Devido ao coeficiente de expansão térmica da cera ser cerca de 2 vezes maior do que o do material cerâmico, a cera tende a expandir-se criando tensões no molde cerâmico. A pressão de 5 a 7 bar, na autoclave, age no sentido de reter a expansão da cera e evitar a quebra da casca cerâmica, enquanto a cera derrete deixando o molde vazio.

Outra característica no uso de padrões de cera é que o calor fornecido pela autoclave, inicialmente, derrete as camadas mais externas da cera, agindo como um “buffer” que permite a expansão do núcleo de cera ainda sólido. Este comportamento é bastante diferente dos padrões de estereolitografia para microfusão, como será visto nas próximas seções deste capítulo.

3.2.1.5 SINTERIZAÇÃO DA CASCA CERÂMICA

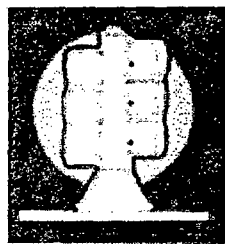


Figura 22 - Sinterização da casca cerâmica

Após a remoção da maior parte da cera do interior do molde cerâmico, este é levado para um forno de calcinação por aproximadamente 2 horas, com o forno operando em temperaturas entre 1.100°C e 1.600°C, dependendo da temperatura de vazamento do metal líquido. Esta etapa serve para três propósitos principais: (1) dar resistência à casca cerâmica de forma a suportar as altas temperaturas de vazamento, (2) queimar o restante da cera que permaneceu no

interior da casca cerâmica e que não foi extraída durante a etapa de autoclave e (3) para trazer a casca cerâmica à uma temperatura próxima à temperatura de vazamento do metal líquido, reduzindo o problema de trincas por choque térmico.

3.2.1.6 VAZAMENTO DO METAL LÍQUIDO

A próxima etapa no processo de microfusão é o vazamento do metal selecionado para o interior do molde cerâmico. Nesta etapa, o metal previamente fundido é vazado para o interior do molde com um superaquecimento suficiente para preenchê-lo completamente antes de a solidificação começar. O metal pode ser simplesmente vazado preenchendo o molde por ação da força gravitacional ou, com o auxílio de vácuo, pressão, vibração ou centrifugação.

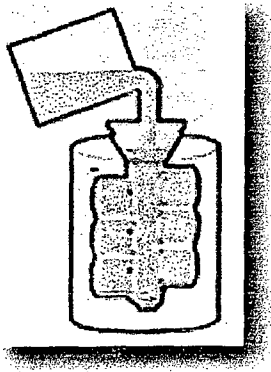


Figura 23 - Vazamento do metal líquido no interior do molde cerâmico

Tipicamente, para o alumínio, a temperatura da casca fica em torno de 315°C e do alumínio fundido cerca de 590°C. Para os aços, a temperatura da casca fica em torno de 980°C - 1050°C e do aço fundido entre 1500°C e 1600°C.

Terminado o vazamento, o metal é resfriado e solidifica-se, adquirindo a forma imposta pela cavidade do molde cerâmico. Dependendo das propriedades metalúrgicas desejadas, o resfriamento pode ser ao ar, em óleo ou na água.

3.2.1.7 QUEBRA DO MOLDE CERÂMICO

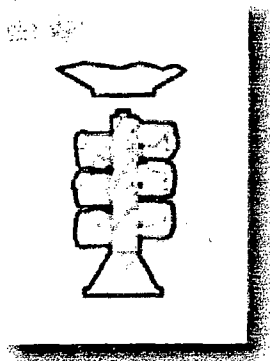


Figura 24 - Quebra da casca cerâmica

Uma vez solidificadas e resfriadas, as peças são removidas do molde. Vários métodos são usados e um deles é impor uma vibração às árvores para quebrar a casca cerâmica que envolve as peças fundidas. Depois de eliminar a maioria do material da casca cerâmica, as peças fundidas são colocadas em um banho de soda cáustica para remoção de qualquer material que tenha permanecido aderido em regiões de difícil acesso.

3.2.1.8 ACABAMENTO DAS PEÇAS FUNDIDAS



Figura 25 - Acabamento das peças fundidas

A última etapa do processo é a de acabamento. Nesta etapa as peças fundidas são separadas dos canais de alimentação com um disco de corte ou uma serra. As rebarbas deixadas pela remoção dos canais de alimentação são retificadas próximo à peça. Se necessário, tratamentos térmicos podem ser executados quando a microestrutura e as propriedades das peças fundidas assim o exigirem. Para alguns tipos de geometrias, como superfícies planas e finas, bem como aquelas onde as dimensões em uma das direções é muito maior do que em outra, uma operação de desempenamento é necessária para remover qualquer distorção que o fundido possa ter experimentado durante o resfriamento. Depois de completados os ciclos de tratamento térmico as peças podem sofrer acabamento superficial antes de serem enviadas para o raio-X, para então serem entregues aos clientes.

Na próxima seção serão apresentadas as características do processo de microfusão usando padrões obtidos por estereolitografia, suas vantagens e limitações, bem como as diferenças em relação ao processo tradicional de microfusão que utiliza padrões de cera.

3.3 DESENVOLVIMENTO DOS PADRÕES DE ESTEREOLITOGRAFIA PARA MICROFUSÃO

As primeiras tentativas de se usar protótipos de estereolitografia para servirem como padrões para o processo de microfusão utilizaram um modelo sólido da peça [37,39,55]. Infelizmente as tentativas de usar peças sólidas como padrões de fundição não obtiveram sucesso. Em inúmeros casos, o aquecimento do padrão durante as etapas de autoclave e queima da casca cerâmica causaram a expansão térmica da resina, o que produzia uma substancial pressão interna, resultando no colapso do molde cerâmico [39].

Como os problemas em usar padrões de fundição sólidos envolviam, essencialmente, a expansão térmica de seções espessas de resina curada, partiu-se para o desenvolvimento de padrões semi ocos, gerados a partir de uma resina com boas características de queima [37]. Isto deveria permitir a sobrevivência da casca cerâmica. A idéia principal foi a de que se o padrão fosse, em sua maioria, oco e feito de uma resina que amolecia a uma temperatura relativamente baixa, ele poderia colapsar para dentro

dele próprio antes que tensões suficientes fossem desenvolvidas para quebrar a casca cerâmica [37]. Entretanto para gerar padrões semi ocos seria essencial descobrir um meio pelo qual a resina líquida (não curada) pudesse ser drenada do seu interior. Isto foi conseguido através do desenvolvimento dos estilos de construção para as peças de estereolitografia [37].

3.3.1 Estilos de Construção na Estereolitografia

Os estilos de construção desenvolvidos para o processo de estereolitografia nada mais são do que listas de parâmetros que são usados durante o processo de fatiamento e geração do programa de comando numérico para construir objetos com diferentes características, propriedades e aplicações [36,41]. Tipicamente, os arquivos de estilos consistem de informações sobre o tipo de máquina que será usada para a construção das peças, o tipo de resina a ser usada, parâmetros específicos de cura pelo laser, como por exemplo, profundidade de cura, quantidade de energia necessária para polimerizar a resina, além dos parâmetros de construção que caracterizam cada estilo de construção [41].

Existem, atualmente, três diferentes estilos de construção de objetos sólidos e um estilo para construção de objetos parcialmente ocos. Os estilos sólidos são *STAR-Weave™* ou *FAST™* e *Accurate Clear Epoxy Solid - ACES™* ou *EXACT™* e o novo estilo *TOOLING™*. O estilo semi-oco é o *QUICKCAST™* [2,4]. A seguir serão apresentadas as principais características de cada estilo de construção [4]:

3.3.1.1 ESTILO DE CONSTRUÇÃO *STAR-WEAVE™* OU *FAST™*

Este estilo foi desenvolvido, inicialmente, para resinas acrílicas, mas também pode ser usado com algumas resinas a base de epóxi. Os parâmetros deste estilo permitem construir os modelos deixando pequenas quantidades de resina não curadas entre os vetores transversais de varredura do laser² e entre as bordas das camadas. Esta característica permite acelerar a construção dos protótipos, pois nem toda a seção transversal da peça é varrida pelo laser. A resina líquida não curada permanece no interior da peça e é, posteriormente, curada em um equipamento de pós-cura contendo lâmpadas de radiação ultravioleta [2,41].

Porém, existem algumas desvantagens com o uso deste estilo de construção: (i) é necessário fazer uma compensação das distorções da peça devido à resina não curada no

² Os vetores transversais correspondem às linhas traçadas pelo sistema laser (trajetórias X&Y) durante a fotopolimerização da seção transversal da peça.

interior do padrão que sofre uma contração durante a fase de polimerização. (ii) Este estilo de construção era usado, inicialmente, com resinas acrílicas que apresentavam índices de contração maiores que as resinas epóxi durante a cura, resultando em (iii) uma baixa precisão dimensional das peças construídas com este estilo de construção [2].

3.3.1.2 ESTILO DE CONSTRUÇÃO ACES™ OU EXACT™

ACES™ é um estilo de construção desenvolvido estritamente para resinas epóxi. Os parâmetros ACES™ fornecem 4 vantagens sobre os parâmetros *STAR-Weave™* [2]: (i) alta claridade óptica ao longo da peça, (ii) excelente acabamento superficial em regiões planas horizontais, (iii) aumento da homogeneidade de resistência da peça nas direções X,Y,Z e (iv) aumento da precisão dimensional. Este estilo de construção consegue estas características sobrepondo os vetores transversais de varredura do laser. Este processo assegura uma cura quase completa dentro das fronteiras da peça. Terminada a construção, as peças saem da máquina com cerca de 98% de sua massa curada, sendo posteriormente colocadas em um forno de radiação ultravioleta para completar a cura, deixando os objetos completamente sólidos [36]. A figura 26 mostra o aspecto típico de um objeto construído usando o estilo de construção ACES™.

3.3.1.3 ESTILO DE CONSTRUÇÃO TOOLING™

Da mesma forma que o estilo ACES™, este estilo de construção produz objetos sólidos em resina. A diferença é que o estilo de construção Tooling™ utiliza parâmetros mais refinados para a construção dos objetos. Por exemplo: enquanto o estilo ACES™ permite construir objetos com espessuras de camada variando entre 0.10 mm e 0.15 mm, a espessura de camada utilizada pelo estilo Tooling™ é de 0.05 mm [4]. Isto permite a construção de objetos mais precisos como os exigidos na fabricação de insertos para o processo de moldagem por injeção, entretanto o tempo consumido para fabricar um objeto aumenta, pois o número de camadas aumenta com a redução da espessura de cada camada.

3.3.1.4 ESTILO DE CONSTRUÇÃO QUICKCAST™

Este estilo de construção é usado, juntamente com resinas epóxi, para construir peças semi-ocas que podem ser usadas diretamente no processo de microfusão [2,36,41].

Os parâmetros usados por este estilo de construção permitem a fabricação de objetos sob a forma de uma casca estruturada internamente por uma malha ou rede muito fina semelhante à de uma colmeia de abelhas [36,41]. A superfície externa do padrão reproduz exatamente a forma geométrica desejada da peça, enquanto a estrutura interna

possui uma topologia tal que permite que a resina líquida, não curada, existente em seu interior possa ser drenada através de pequenos furos, especialmente projetados e posicionados na superfície do objeto [36]. Isto permite que cerca de 60 a 80% de seu volume seja preenchido por ar. Uma listagem dos parâmetros utilizados por este estilo de construção é mostrada na tabela 13 no capítulo IV.

Este estilo de construção não foi contemporâneo ao desenvolvimento da estereolitografia. Ele surgiu cerca de três anos após a primeira máquina de estereolitografia como uma resposta às necessidades do setor de fundição. A seção 3.3.2 apresenta as características de desenvolvimento deste estilo de construção.

A figura 26 ilustra dois estilos de construção possíveis de serem construídos pelo processo de estereolitografia.

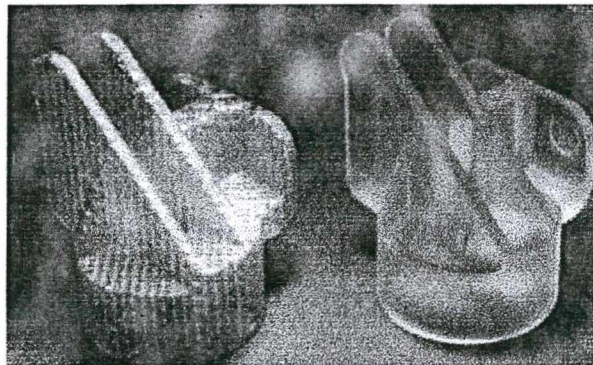


Figura 26 - Estilos de construção: *QuickCast™* (à esquerda) e *ACES™* (à direita)

3.3.2 Características Construtivas dos Padrões *QuickCast™*

Os padrões de estereolitografia para microfusão ou padrões *QuickCast™* são construídos utilizando-se um estilo de construção que resulta em um padrão semi-oco, com uma estrutura interna semelhante a uma colmeia de abelhas, possibilitando que cerca de 60% a 80% de seu volume seja preenchido com ar [10,36,39,41]. Este estilo de construção, em combinação com o desenvolvimento de resinas epóxi e com a otimização da estrutura interna destes padrões, resultou em um padrão de fundição mais compatível com o processo de microfusão [36,41].

Os padrões de estereolitografia podem ser usados como substitutos diretos dos convencionais padrões de cera no processo de microfusão [41]. As etapas gerais de processamento utilizando padrões de estereolitografia são basicamente as mesmas do processo convencional de microfusão. Entretanto, algumas modificações são requeridas por conta das diferenças de comportamento entre os padrões *QuickCast™* e os padrões de cera [40,41]. As principais características destes padrões são descritas a seguir.

3.3.2.1 TOPOLOGIA DA ESTRUTURA INTERNA DOS PADRÕES

Construir peças quase ocas usando a estereolitografia não é intrinsecamente difícil. O desafio é desenvolver uma estrutura geométrica que, simultaneamente, possua as seguintes características [40]:

- Garanta precisão ao padrão de fundição;
- Permaneça suficientemente resistente em temperatura ambiente para evitar danos durante a manipulação e na fase de composição da casca cerâmica;
- Permita que a resina não curada seja drenada eficientemente do interior dos padrões;
- Promova meios para o padrão colapsar internamente à elevadas temperaturas evitando a quebra do molde cerâmico.

O objetivo do método *QuickCast*TM é construir uma peça de maneira que cada célula da estrutura interna comunique-se com todas as outras células, permitindo que a resina líquida não curada flua de qualquer posição dentro do padrão para qualquer outra localização [4,39,41].

Para criar estas passagens entre as células a topologia da estrutura interna (hachura) é repetidamente traçada pelo laser durante um determinado número de camadas, correspondentes a uma altura ($d_z=H$), quando, então, é deslocada de uma certa quantidade d_x e d_y até que uma nova altura $Z+d_z$ seja alcançada. Chegando nesta posição, novamente ocorre um deslocamento, só que no sentido negativo dos eixos X e Y, ($-d_x$ e $-d_y$), retornando à configuração original. Este padrão de hachura continua alternando até que as paredes da peça sejam alcançadas [41].

Existem três diferentes formas para os padrões de hachura: quadrada, triangular eqüilateral e hexagonal [4,41]. No padrão triangular, as linhas que compõem a estrutura interna formam ângulos de 0° , 60° e 120° com o eixo X. Em cada direção as linhas paralelas ao eixo X possuem o mesmo espaçamento h_a , igual à altura do triângulo. Estas linhas formarão triângulos eqüilaterais na qual os vértices dos triângulos que serão deslocados localizam-se diretamente acima dos centróides dos triângulos da seção anterior. Para atingir esta condição, as translações horizontais no plano da resina são $d_x = h_a/\sqrt{3}$ e $d_y = h_a/3$ [41], como mostrado na figura 27.

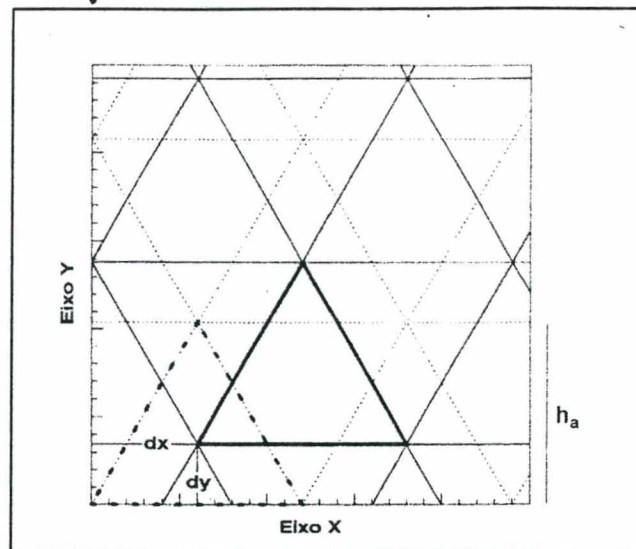


Figura 27 - Padrão de hachura usando triângulos equiláterais.

No estilo de hachura quadrada, os valores para o espaçamento nos eixos X e Y são h_x e h_y , respectivamente. Para melhorar a taxa de fluxo de resina líquida, os valores de deslocamento $d_x = h_x/2$ e $d_y = h_y/2$ devem ser selecionados. Torna-se claro, então, que as células da primeira e da terceira seções verticais são conectadas via células da segunda seção através de passagens com altura H na direção Z , sendo que o fluxo de resina líquida é também limitada por H [41]. O estilo de hachura hexagonal funciona de maneira análoga ao estilo quadrado.

3.3.2.2 DRENAGEM DA RESINA LÍQUIDA DO INTERIOR DOS PADRÕES

O estilo de construção QuickCast™ é baseado no conceito de drenagem da resina líquida não curada do interior do padrão [4,36,39,41,55]. Entretanto, como será visto mais adiante é absolutamente fundamental que estes padrões sejam suficientemente bem drenados para que nenhuma seção sólida com espessura maior que uma espessura crítica permaneça em qualquer local dentro do padrão.

Os padrões QuickCast™ dependem de uma estrutura interna capaz de fornecer uma eficiente drenagem da resina [55]. Como visto anteriormente, matematicamente, o estilo de construção QUICKCAST possui uma estrutura interna cuja topologia é simplesmente conectada, isto é, estando o padrão sujeito somente a limitações de forças de tensão viscosas e superficiais, a resina deve estar apta a fluir de qualquer lugar dentro da peça para qualquer outro local, independente da geometria do padrão [4,39]. Claramente, se o segundo local é uma abertura, então o padrão pode ser drenado da resina líquida não curada [39].

Estas pequenas aberturas ou furos na superfície do padrão são os **drenos e respiros**, que devem ser previstos para que a resina possa deixar o interior do padrão. Os respiros permitem que o ar entre em volumes evacuados, evitando qualquer retardo no fluxo devido a criação de regiões de pressão reduzida. Estes pequenos furos serão posteriormente lacrados para que o material cerâmico não invada o interior do padrão durante a etapa de composição da casca cerâmica [39].

O tempo requerido para drenar completamente um padrão é função da [39,55]:

- Geometria da peça;
- Viscosidade da resina;
- Tensão superficial da resina;
- Tipo e espaçamento da estrutura interna do padrão;

Peças com vários detalhes levarão um tempo mais longo do que simples cubos. Para conseguir uma boa drenagem de peças com geometrias arbitrárias, especialmente aquelas que envolvem seções finas, curvas e relativamente longas, é importante que a viscosidade da resina seja tão baixa quanto possível. Resinas com baixa tensão superficial reduzem os efeitos de capilaridade e, portanto, tendem a fluir mais facilmente em cantos, ou pequenas reentrâncias presentes no interior das peças. Finalmente, uma estrutura interna largamente espaçada aumenta significativamente a velocidade de drenagem, sendo que, de acordo com a referência [55], a taxa de drenagem de um padrão *QuickCast™* é proporcional à quarta potência do tamanho da célula.

A taxa de vazios (R_v), isto é, a razão entre a massa de um padrão *QuickCast™* (M_Q) e a massa de um padrão sólido (M_S) de igual volume externo, definida pela relação (3.1), é um parâmetro que pode ser usado para medir a eficiência da drenagem [41].

$$R_v = 1 - (M_Q / M_S) \quad (3.1)$$

Obviamente, quando a peça é sólida, então, $M_Q = M_S$, conseqüentemente, $R_v = 0$. Reciprocamente, quanto maior o valor de M_Q , mais alto é o valor de R_v . Observações em numerosos testes de autoclave mostraram que quanto maior o valor de R_v , maior a probabilidade de sucesso nesta etapa [41]. A figura 28 mostra o relacionamento entre a taxa de vazios do padrão e o rendimento de peças fundidas de boa qualidade, baseado na experiência adquirida durante o desenvolvimento do *QuickCast™* em fundições nos EUA.

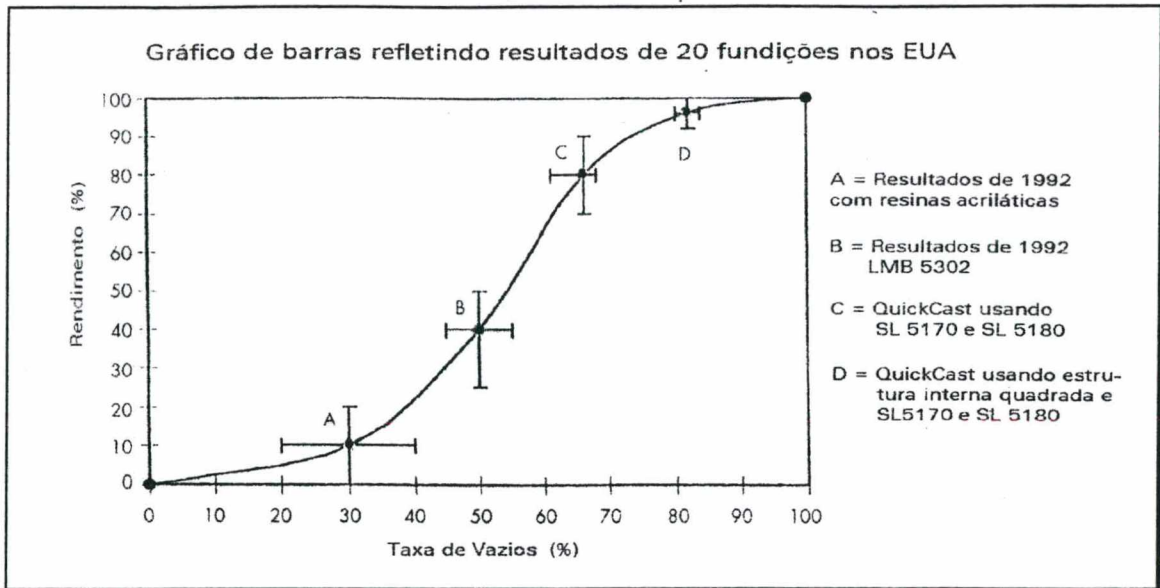


Figura 28 - Relacionamento entre a taxa de vazios de um padrão QuickCast™ e o rendimento de peças de qualidade [37].

Os dados da figura 28 mostram que quando a taxa de vazios (R_V) aumenta, a probabilidade de eliminar o padrão de resina epóxi sem danificar a casca cerâmica também aumenta.

3.3.2.3 CARACTERÍSTICAS DA RESINA UTILIZADA PARA CONSTRUIR OS PADRÕES DE FUNDIÇÃO

As propriedades dos materiais utilizados por estas tecnologias, especialmente no caso dos fotopolímeros para estereolitografia, têm sido um instrumento na expansão de um grande número de novas aplicações. As aplicações resultantes somente têm sido possíveis graças aos avanços na precisão dimensional e propriedades mecânicas das peças construídas a partir de fotopolímeros recentemente desenvolvidos [39,55].

Os fotopolímeros utilizados pela estereolitografia para construir os padrões de fundição exibem uma característica completamente diferente da apresentada pela cera utilizada no processo tradicional. A diferença está no fato de que os fotopolímeros são materiais termofixos que realizam ligações cruzadas entre seus monômeros e portanto não apresentam a característica de amolecer até que sua viscosidade permita o fluxo do material, como é o caso da cera de fundição [39,55]. Quando aquecidos, os padrões de SL tendem a amolecer um pouco, mas nunca o suficiente para fluir [55]. Conseqüentemente, os padrões QuickCast™ não podem ser removidos da casca cerâmica usando um ciclo de extração tradicional em uma autoclave a vapor.

No processamento dos padrões de SL, o ciclo de vapor da autoclave é usado somente para remover a árvore de cera onde os padrões de SL estão presos. Estes padrões são eliminados somente na etapa de queima da casca cerâmica [21,55]. Modificando as condições de processo desta operação, o ciclo de queima pode ser utilizado, simultaneamente, para conseguir os dois propósitos: sinterizar a casca cerâmica e queimar o padrão *QuickCast™*.

Uma outra propriedade física importante das resinas que exercem um impacto sobre o processo de fundição é o seu coeficiente de expansão térmica (CTE). As resinas usadas no processo de estereolitografia para construção dos padrões, depois de curadas possuem um CTE positivo, uma ordem de magnitude maior que os típicos materiais que compõe a casca cerâmica [36,83]. Conseqüentemente, quando calor é aplicado para remover os canais de alimentação na autoclave, os padrões de SL se expandirão mais do que a casca cerâmica. Esta expansão térmica exercerá considerável tensão sobre a casca envolvente [83].

No processo tradicional de fundição por cera perdida, os padrões de cera também exercem uma tensão de expansão similar. Entretanto, como a cera possui um baixo ponto de fusão (entre 40°C e 50 °C), o acúmulo de tensões é rapidamente aliviado quando a cera começa a derreter e abandona o molde [83]. Com os padrões de SL, a tensão de expansão não é aliviada até a temperatura de combustão da resina que é em torno de 400°C [11,20].

3.3.3 Fundamentos da Expansão Térmica dos Padrões de SL

A seguir será mostrado um modelo matemático simplificado dos processos físicos que ocorrem no interior da casca cerâmica, descrito por JACOBS [37] em seu capítulo VI.

Considerando uma seção sólida cilíndrica de um padrão de estereolitografia de raio “R”, coberto com uma casca cerâmica anular com uma espessura uniforme “a”, onde o eixo neutro do conjunto padrão SL/casca é “N-N” e a interface é “S-S”, conforme mostrado na figura 29 a seguir:

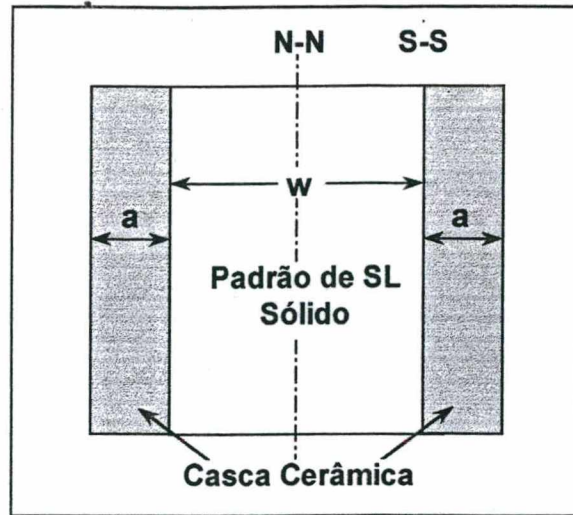


Figura 29 - Seção transversal de um padrão de SL coberto com casca cerâmica

O coeficiente de expansão térmica linear da resina usada para construir os padrões de SL é chamado " α_R " (mm/mm $^{\circ}$ C). O padrão e a casca são, simultaneamente, aquecidos desde a temperatura ambiente " T_A ", até uma temperatura mais elevada T_F , onde :

$\Delta T = T_F - T_A$. O padrão de resina expandirá em torno de "N-N", com o deslocamento de "S-S" sendo dado por:

$$\Delta R = \alpha_R \cdot R \cdot \Delta T \quad (3-2)$$

Entretanto, ao mesmo tempo, o material da casca também se expande com base em seu CTE, α_S (mm/mm $^{\circ}$ C). A casca anular sofre uma expansão térmica em torno de N-N.

O deslocamento de S-S é no mesmo sentido do deslocamento do padrão, pois o diâmetro interno de um cilindro aumenta quando aquecido. A expansão da casca é calculada como se o cilindro inteiro fosse feito de material cerâmico, assim:

$$\Delta a = \alpha_S \cdot R \cdot \Delta T \quad (3-3)$$

A deformação produzida na casca cerâmica, ϵ_S , na seção S-S, devido aos efeitos combinados da expansão da casca e do padrão, é obtido subtraindo a equação 3-3 da equação 3-2 e dividindo pela espessura da casca, a .

$$\epsilon_S = (\Delta R - \Delta a) / a = (\alpha_R - \alpha_S) \cdot R \cdot \Delta T / a \quad (3-4)$$

Assumindo que o material cerâmico obedece a Lei de Hooke, então a tensão na casca cerâmica é dada por:

$$\sigma_S = Y_S \cdot \epsilon_S = Y_S \cdot (\alpha_R - \alpha_S) \cdot R \cdot \Delta T / a \quad (3-5)$$

Onde Y_S é o módulo de *Young* do material da casca. Deve-se notar que se o CTE da resina polimerizada fosse igual ao CTE da casca cerâmica, então a tensão sobre a casca desaparece. Isto é razoável desde que o padrão e a casca se expandiriam juntos como se eles fossem efetivamente do mesmo material.

Se o CTE da resina excede ao CTE do material cerâmico, então uma tensão finita irá existir $R > 0$, $\Delta T > 0$ e $Y_S > 0$, a menos que a espessura da casca, a , aproxime-se do infinito. O interessante é que o limite superior, longe de ser um absurdo, é uma situação prática para o caso do molde sólido.

Se $\sigma_S < \sigma_{CRIT}$ (tensão crítica de fratura do material cerâmico), a casca cerâmica permanecerá intacta. Entretanto, sempre que $\sigma_S > \sigma_{CRIT}$, a falha na casca irá ocorrer. O caso crítico para iminente fratura da casca ocorre quando a espessura da seção de resina sólida é igual a “espessura crítica”, W_{CRIT} . Assim, sempre que $R = W_{CRIT}$ então $\sigma_S = \sigma_{CRIT}$. Substituindo na equação 3-5 e rearranjando, obtém-se a seguinte relação na forma adimensional:

$$\frac{W_{CRIT}}{a} = \frac{\sigma_{CRIT}}{Y_S \cdot (\alpha_R - \alpha_S) \cdot \Delta T} \quad (3-6)$$

A equação 3-6 indica que a espessura crítica W_{CRIT} , de um padrão de SL sólido é proporcional à espessura da casca e à taxa de tensão crítica dividida pelo módulo de Young da casca. Ela é inversamente proporcional à diferença entre os CTE's do material do padrão (resina SL) e o material da casca cerâmica. Conseqüentemente, cascas mais grossas permitirão seções sólidas do padrão mais espessas também. Infelizmente, cascas mais grossas requerem coberturas adicionais de material cerâmico, o que aumenta o tempo total de construção da casca, os custos e podem afetar adversamente nas propriedades metalúrgicas do fundido devido ao retardo da taxa de resfriamento.

Cascas com grandes níveis de tensão crítica proporcionarão grandes valores de W_{CRIT} para padrões sólidos de resina. Mais importante, a máxima espessura permissível de qualquer seção não drenada e, subseqüentemente pós curada, também aumentará. Isto explica porquê cascas baseadas em alumina permitem que padrões *QuickCast*TM sejam mais pobremente drenados do que cascas baseadas em sílica, que depende de uma drenagem mais eficiente.

Finalmente, como $\alpha_R \gg \alpha_S$ para todas as resinas fotopoliméricas e todos os materiais de cascas conhecidos, fica claro que algum valor finito de espessura de seção crítica, W_{CRIT} , ocorrerá em todos os casos.

Para estimar este valor serão considerados os materiais utilizados nas experiências realizadas neste trabalho, ou seja, considerando o caso de um padrão feito em resina epóxi SL5170 e coberto com uma casca baseada em silicato de zircônio que sofrerá remoção dos canais alimentação em uma autoclave. A figura 30 mostra os dados de CTE para a resina SL5170. Como a autoclave leva a resina de uma temperatura de 25 °C para aproximadamente 110 °C, o valor médio de $\alpha_R \approx 90.10^{-6}$ mm/mm-°C. Os demais valores relevantes são tabelados abaixo:

Tabela 7 - Valores típicos para cálculo da seção sólida crítica de um padrão de SL usando resina SL5170 e sílica crua como material da casca cerâmica

Variável	Valores	Fonte
Coeficiente de Expansão Térmica Linear da resina SL5170	$\alpha_R \approx 90.10^{-6}$ mm/mm -°C	Dados da figura 30
Coeficiente de Expansão Térmica Linear característico da sílica	$\alpha_S \approx 7.10^{-6}$ mm/mm -°C	Típico do silicato de zircônio
Variação da temperatura experimentada na autoclave	$\Delta T = 110^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} =$ $\Delta T = 85^\circ\text{C}$	Remoção da cera em autoclave
Tensão crítica de fratura	$S_{CRIT} \approx 35$ Mpa	Dados de testes feitos pela 3D Systems p/ uma casca de sílica/zirconita
Módulo de Young do material da casca	$Y_S \approx 8400$ Mpa	Dados de testes feitos pela 3D Systems para uma casca de
Espessura da casca cerâmica	$a = 10$ mm	Selecionada

Substituindo estes valores na equação 3-6 obtemos os seguintes resultados:

$$W_{CRIT} = 10 \cdot [30 / 8400] / (83.10^{-6}.85) = 5.06 \text{ mm}$$

Assim, a equação 3-6 mostra que, para o caso de uma casca cerâmica baseada em sílica crua, de 10 mm de espessura, experimentando uma temperatura de remoção dos canais de alimentação (autoclave) de 110°C, a espessura de seção crítica para um padrão sólido usando a resina SL5170 é de 5.06 mm. Conseqüentemente, qualquer padrão contendo seções sólidas maiores que 5 mm provavelmente levará à fratura da casca cerâmica. Este resultado provavelmente explica o porquê de numerosas falhas que freqüentemente ocorrem durante a operação de autoclave.

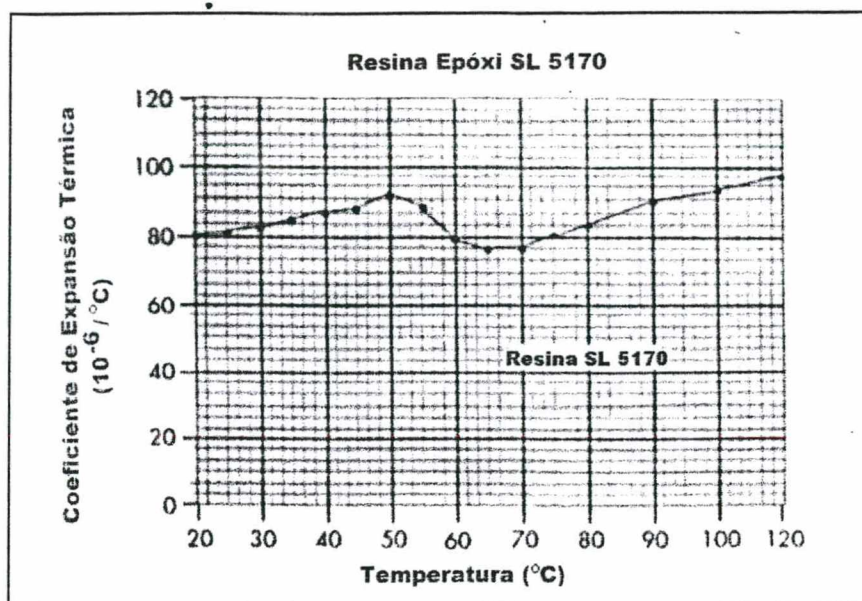


Figura 30 - Dados de testes para CTE da resina SL 5170 [11].

O próximo capítulo apresentará os estudos de casos realizados, descrevendo os procedimentos experimentais adotados tanto para fabricação dos padrões de fundição como os parâmetros usados durante o processo de microfusão.

Capítulo

4

Procedimentos Experimentais**4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Para atingir os objetivos propostos foi empregada uma sistemática baseada no desenvolvimento de estudos de casos. Ao longo deste capítulo são apresentados os procedimentos que foram utilizados para a fabricação de protótipos metálicos funcionais e insertos para moldes de injeção de plásticos utilizando padrões de estereolitografia como modelos consumíveis no processo de microfusão. Também serão apresentadas quais foram as variáveis ou parâmetros estudados e como os estudos foram conduzidos.

Tendo em vista a falta de informações à respeito do comportamento de expansão térmica dos padrões QuickCast™ e de quais parâmetros de construção produziram melhores resultados na etapa de fundição e também devido à falta de experiência com o uso de padrões QuickCast™ por parte da empresa de fundição que auxiliou nos trabalhos experimentais, decidiu-se separar a parte experimental do trabalho em duas fases, conforme mostrado na figura 31 a seguir:

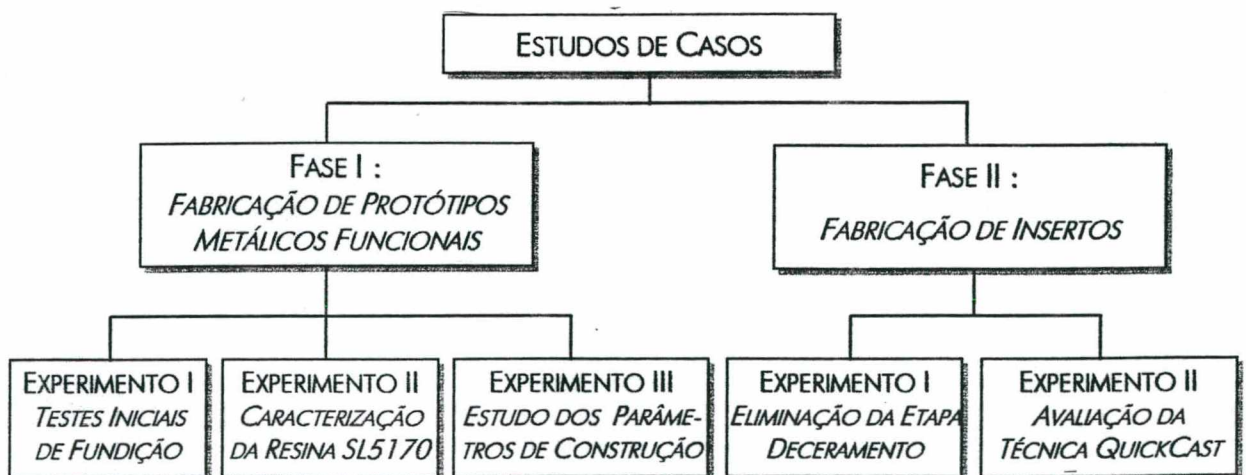


Figura 31 – Modelo esquemático referente aos estudos de casos realizados.

- Uma **fase inicial** que teve o objetivo de proporcionar um aprofundamento teórico-prático a respeito das tecnologias (estereolitografia e microfusão) envolvidas na fabricação de protótipos metálicos. Nesta fase foram estudados aspectos construtivos dos padrões QuickCast™ e a sua influência na qualidade das peças fundidas. Esta fase teve, portanto, um caráter mais abrangente e introdutório ao assunto, dando uma ênfase maior à compreensão dos fenômenos que ocorrem nas diversas etapas do processo de microfusão.
- Uma **segunda fase** dos trabalhos experimentais onde os conhecimentos adquiridos (durante a primeira fase) foram aplicados para a fabricação de insertos para moldes de injeção de plásticos. Nesta segunda fase pretendeu-se identificar as vantagens e limitações de ordem técnica e econômica em relação aos métodos convencionais de fabricação de ferramentas.

4.2 DEFINIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS

4.2.1 Primeira Fase: Fabricação de Protótipos Metálicos Funcionais

Nesta primeira fase dos ensaios experimentais foram estabelecidos dois objetivos principais a serem alcançados: (1) verificar o comportamento dos padrões *QuickCast™* durante as etapas de deceramento na autoclave e de queima dos padrões na etapa de calcinação do molde cerâmico. Sob esse objetivo, buscou-se uma compreensão dos fatores que, preponderantemente, influenciam o comportamento de queima destes padrões para que, (2) numa segunda etapa de experimentos, estes fatores fossem estudados de forma mais criteriosa.

As geometrias escolhidas para a realização destes estudos de casos foram selecionadas de peças disponibilizadas pela empresa PRECICAST – Fundação de Precisão Ltda, bem como de peças tradicionalmente fabricadas por microfusão selecionadas da referência [1]. A primeira fase de testes experimentais de fabricação foi subdividida em três experimentos que foram delineados da seguinte forma:

4.2.1.1 EXPERIMENTO 1 : TESTES INICIAIS DE FUNDIÇÃO

Nestes primeiros testes de fabricação utilizando padrões *QuickCast™* pretendeu-se verificar, qualitativamente, de que forma os padrões se comportam durante as diversas etapas do processo de fabricação descritas no item 3.2.1 do capítulo III.

Para este experimento foram construídos dois conjuntos de padrões, sendo utilizados parâmetros de construção usualmente recomendados pelo fabricante da resina e pelo fabricante da máquina de estereolitografia. Cada conjunto é composto por seis geometrias diferentes sendo que os parâmetros de construção e as condições do processo de microfusão utilizados são mostradas na tabela 8. Na figura 32 são mostradas as geometrias dos padrões de fundição relativos às peças a serem fabricadas no experimento I e a figura 33 mostra uma fotografia dos padrões QuickCast™ construídos para a realização do experimento I.

Parâmetros de construção utilizados*	
Espessura de camada:	0.15 mm
Espessura de parede:	0.45 mm
Tipo de estrutura interna:	Hexagonal
Espaçamento da estrutura interna:	3.125 mm
Diâmetro drenos:	3.6 mm
Diâmetro respiros:	1.2 mm
Fator de contração da resina SL5170:	0.05% (X&Y) 0% (Z)
* Os demais parâmetros de construção foram mantidos constantes e estão listados na tabela 4.5.	
Informações sobre o processo de microfusão	
Material de fundição: Aço Inox 304	
Fator de contração: 1,4% (varia entre 1,2 e 1,6%)*	
Material do molde cerâmico: Silicato de Zircônio	
Número de camadas molde cerâmico: 10	
Tempo de secagem entre camadas: 6 à 8 horas	
Parâmetros da Autoclave	Parâmetros Forno Calcinação
Temperatura do vapor: 100 °C	Temperatura: 1540 °C
Pressão do vapor: 10 bar	Temp. vazamento do Aço: 1620 °C
Tempo: 20 min	Tempo: 1 hora
	Taxa de oxigênio: não medida
* Valor de contração fornecido pela empresa de microfusão envolvida na pesquisa.	

Tabela 8 - Parâmetros utilizados na fabricação dos padrões QuickCast™ durante o experimento I

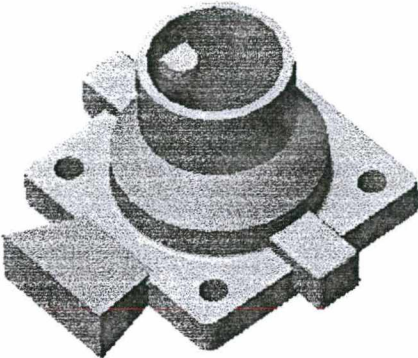
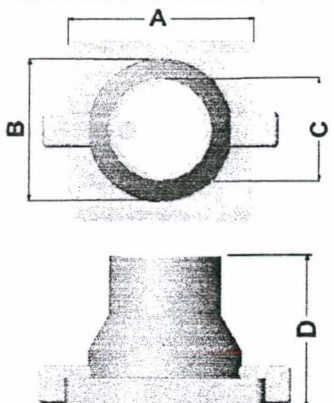
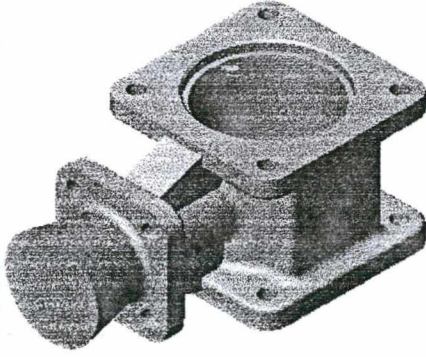
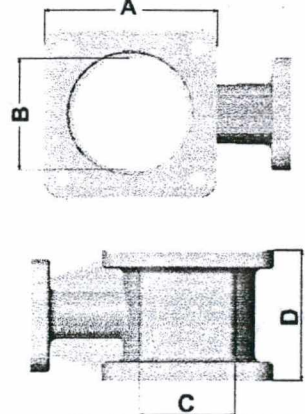
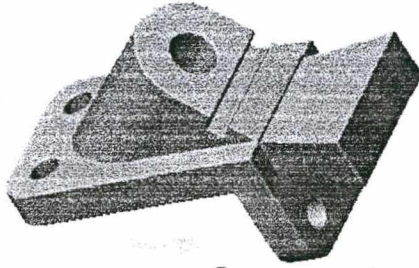
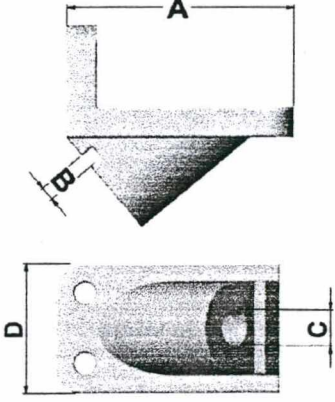
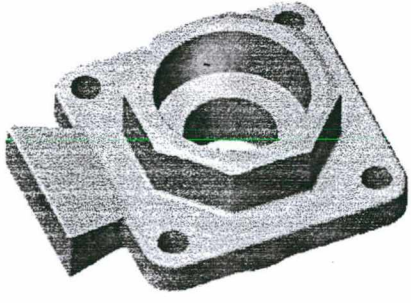
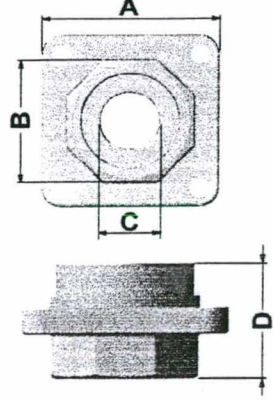
Geometrias utilizadas no teste inicial de fundição		
<p>Identificação</p> <p>Nome: Válvula segurança</p> <p>Quantidade: 02</p>		
<p>Massa dos padrões</p> <p>M_{P1A}: 15,64 g</p> <p>M_{P1B}: 16,27 g</p>		
<p>Taxa de vazios</p> <p>R_{V1A}: 59,7%</p> <p>R_{V1B}: 58,0%</p>		
<p>Identificação</p> <p>Nome: Corpo de válvula</p> <p>Quantidade: 02</p>		
<p>Massa dos padrões</p> <p>M_{P2A}: 17,68 g</p> <p>M_{P2B}: 18,47 g</p>		
<p>Taxa de vazios</p> <p>R_{V2A}: 56,8%</p> <p>R_{V2B}: 54,9%</p>		
<p>Identificação</p> <p>Nome: Suporte de Eixo</p> <p>Quantidade: 02</p>		
<p>Massa dos padrões</p> <p>M_{P3A}: 16,11 g</p> <p>M_{P3B}: 17,73 g</p>		
<p>Taxa de vazios</p> <p>R_{V3A}: 60,7%</p> <p>R_{V3B}: 57,6%</p>		
<p>Identificação</p> <p>Nome: Junta de vedação</p> <p>Quantidade: 02</p>		
<p>Massa dos padrões</p> <p>M_{P4A}: 11,28 g</p> <p>M_{P4B}: 10,61 g</p>		
<p>Taxa de vazios</p> <p>R_{V4A}: 52,0%</p> <p>R_{V4B}: 54,7%</p>		

Figura 32 - Geometrias de padrões QuickCast™ no experimento I (continua).

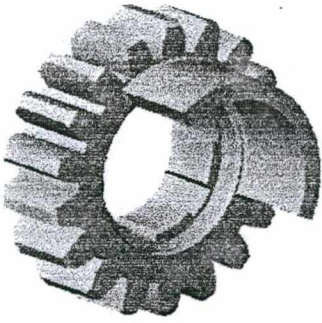
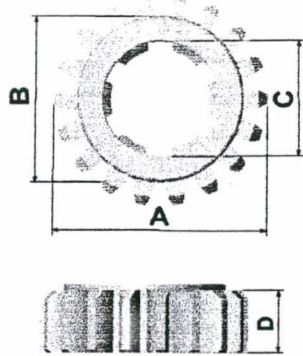

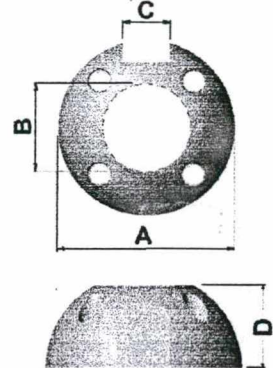
<p>Identificação Nome: Engrenagem Quantidade: 02</p>			
<p>Massa dos padrões M_{P5A}: 5,95 g M_{P5B}: 6,26 g</p>			
<p>Taxa de vazios R_{V5A}: 67,2% R_{V5B}: 65,4%</p>			<p>Identificação Nome: Calota esférica Quantidade: 02</p>
<p>Massa dos padrões M_{P6A}: 16,28 g M_{P6B}: 14,77 g</p>	<p>Taxa de vazios R_{V6A}: 60,9% R_{V6B}: 64,6%</p>		

Figura 32 - Geometrias de padrões QuickCast™ no experimento I (continuação).

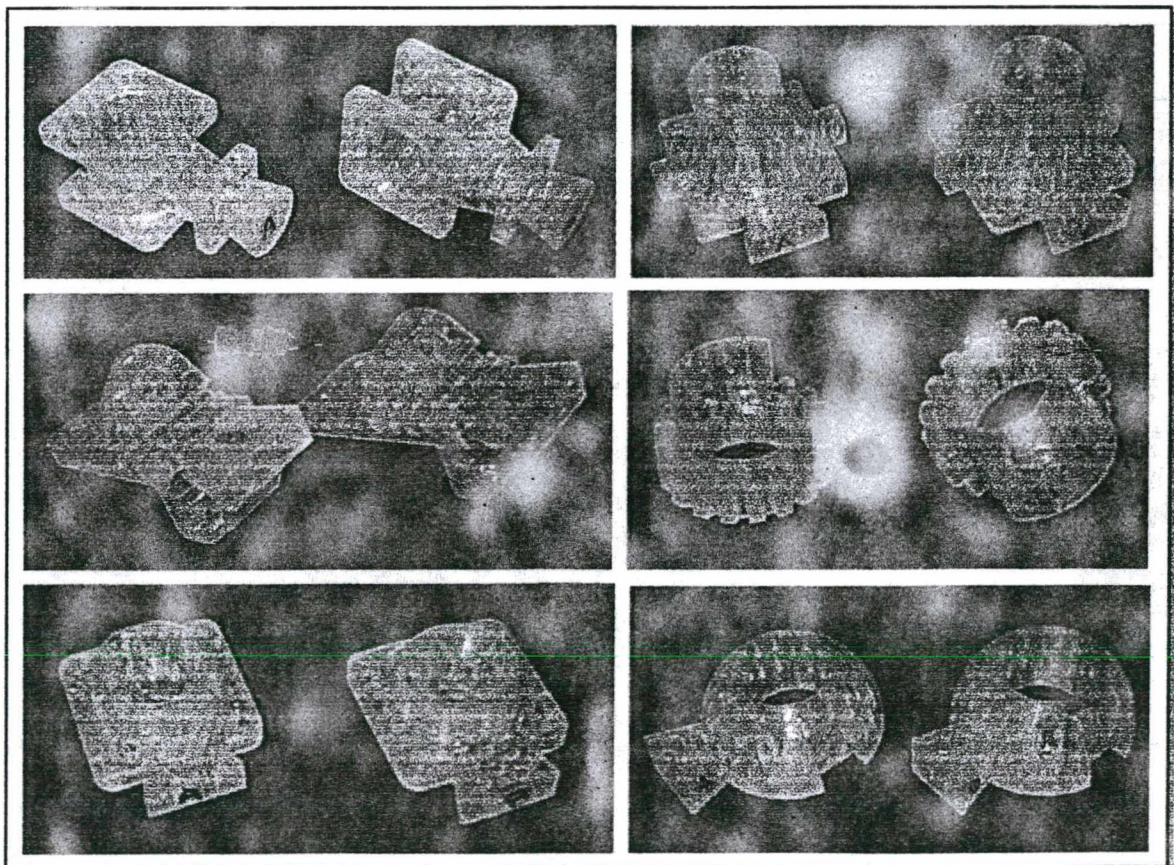


Figura 33 - Padrões QuickCast™ utilizados no Experimento I

4.2.1.2 EXPERIMENTO 2 : CARACTERIZAÇÃO DA RESINA SL5170

O objetivo deste experimento foi compreender melhor o comportamento do material com que os padrões de fundição são construídos (resina epóxi) quando submetido à variações de temperaturas como aquelas tipicamente encontradas no processo de microfusão. Os resultados destes testes deverão fornecer informações importantes acerca do comportamento da resina quando é aquecida desde a temperatura ambiente até a temperatura de deceramento na autoclave bem como até temperaturas próximas às atingidas na etapa de calcinação do molde cerâmico.

Para este estudo foram realizados testes em laboratório utilizando amostras da resina SL 5170 usada para construir os padrões de fundição. Estas amostras foram enviadas para os Laboratórios de Química e de Materiais (LabMat) na UFSC para a realização dos seguintes ensaios:

- Expansão térmica linear
- Decomposição térmica
- Conteúdo de cinzas residuais

A geometria dos corpos de prova utilizados no teste de expansão térmica possui a forma cilíndrica com as seguintes dimensões: ($\phi=8\text{mm}$, $L=30\text{mm}$). Deve-se observar que, para este ensaio, foi utilizado um corpo de prova construído com o estilo sólido (ACES) ao invés de QUICKCAST. A intenção desta mudança foi a de reduzir a influência dos espaços vazios existentes nos corpos de prova QuickCast quando se está medindo a expansão térmica da resina.

Para o ensaio de decomposição termogravimétrica utilizou-se uma amostra de 10,36 mg de resina SL5170 construída em uma SLA250 e pós curada por 30 minutos em uma câmara de radiação ultravioleta. Esta amostra não possuía forma geométrica definida.

Finalmente, no teste para a determinação da quantidade de cinzas residuais foram utilizados quatro corpos de prova cilíndricos com ($\phi=20\text{mm}$, $L=50\text{mm}$) construídos com o estilo de construção QUICKCAST que foram pós-curados e pesados.

Também é importante mencionar que os dois primeiros ensaios foram realizados em condições de laboratório, portanto, diferente das condições reais encontradas em uma autoclave a vapor e mesmo em um forno de calcinação. Entretanto, estas diferenças ambientais não foram consideradas como inválidas para os experimentos uma vez que estes tiveram um caráter mais elucidativo, buscando mostrar a tendência de

comportamento destes padrões sob aquecimento. Entre estas diferenças ambientais estão o teor de oxigênio ou a taxa estequiométrica de ar no interior da câmara de combustão, que influi diretamente na decomposição térmica do material e, conseqüentemente, na quantidade de cinzas residuais após a etapa de queima [41].

EXPANSÃO TÉRMICA

O teste de expansão térmica foi necessário para compreender melhor o relacionamento entre a expansão térmica da resina SL5170 e o aumento da temperatura, principalmente em temperaturas tipicamente encontradas na etapa de deceramento em autoclave. Um dilatômetro existente no Laboratório de Materiais (LABMAT / UFSC) foi usado para medir as mudanças no comprimento dos corpos de prova, desde a temperatura ambiente, até aproximadamente 200°C. Este equipamento plota o percentual de expansão térmica linear com o aumento da temperatura.

DECOMPOSIÇÃO TERMOGRAVIMÉTRICA

O propósito deste teste foi medir a perda de massa de uma amostra (devido à combustão do material) quando a sua temperatura é aumentada até valores maiores que a sua temperatura de ignição. Além disso, a análise termogravimétrica (TGA) pode ser usada para determinar a temperatura na qual a resina utilizada para construir os padrões QuickCast™ começa a entrar em combustão. A significância da medição da massa para esta aplicação particular é que ela determina a temperatura em que a resina começa a se decompor ao ser submetida uma variação de temperatura, além de permitir fazer uma estimativa da quantidade de cinzas residuais após a etapa de queima no processo de microfusão.

QUANTIDADE DE CINZAS RESIDUAIS

Um teste adicional foi realizado para caracterizar a quantidade de cinzas residuais produzidas durante um ciclo de queima. Este teste foi executado em condições reais utilizando um forno de calcinação na própria fundição. Foram produzidos quatro padrões QuickCast™ cilíndricos que foram limpos, pós-curados e pesados antes de serem enviados para a fundição. As amostras foram colocadas em um cadinho cerâmico com tampa semi-aberta para simular as condições do interior de uma casca cerâmica durante uma hora, a uma temperatura de 1.600°C.

4.2.1.3 EXPERIMENTO 3 : ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DOS PADRÕES QUICKCAST™ PARA MICROFUSÃO

Este terceiro experimento teve o objetivo de estudar o comportamento de queima dos padrões QuickCast™. Para isso, foram selecionados três parâmetros de construção (mostrados na tabela 8) para serem ensaiados visando-se determinar a sua influência no comportamento de expansão durante as etapas de deceramento e calcinação. Uma única geometria (mostrada na figura 34) foi escolhida para a realização destes experimentos. Esta geometria foi selecionada por ser representativa do processo de microfusão e por possuir determinadas características geométricas que são difíceis ou mais demorados para se obter por outros processos de fabricação.

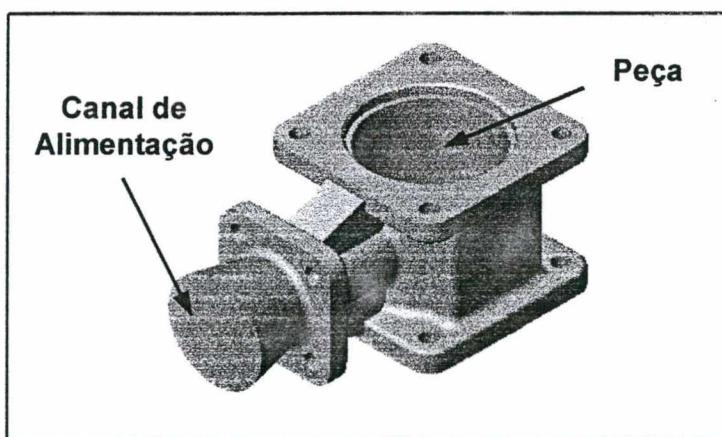


Figura 34 - Geometria das peças a serem fabricadas no segundo experimento.

Com a seleção de apenas uma geometria excluiu-se o fator geométrico como uma variável adicional a ser estudada, pois, determinadas geometrias tendem a concentrar mais tensões no molde cerâmico do que outras e conseqüentemente tendem a provocar mais trincas ou fraturas. Isto influenciaria nos resultados dos testes e conseqüentemente no rendimento durante a etapa de microfusão. Além disso, utilizando-se apenas uma geometria para testar vários parâmetros diminui-se a quantidade de padrões QuickCast™ necessários e, conseqüentemente, os altos custos na fabricação dos padrões.

Para este terceiro experimento foram construídos dois conjuntos de 9 padrões QuickCast™, sendo que em cada conjunto são ensaiados parâmetros de construção específicos. Um desenho esquemático deste experimento é apresentado na tabela 9, a seguir:

Tabela 9 - Delineamento dos ensaios para o experimento III.

PARÂMETRO DE CONSTRUÇÃO AVALIADO		VALORES TESTADOS	Nº DE PADRÕES CONSTRUÍDOS
01	Espessura de parede do padrão QuickCast™	EP ₁ = 0.30 mm EP ₂ = 0.45 mm EP ₃ = 0.60 mm	2 . (EP ₁ +EP ₂ +EP ₃) = 6 padrões
02	Tipo de estrutura interna dos padrões QuickCast™	TEI ₁ = Triangular TEI ₂ = Quadrada TEI ₃ = Hexagonal	2 . (TEI ₁ +TEI ₂ +TEI ₃) = 6 padrões
03	Espaçamento da estrutura interna dos padrões QuickCast™	EEl ₁ = 1.5 mm EEl ₂ = 3.125 mm EEl ₃ = 6.0 mm	2 . (EEl ₁ +EEl ₂ +EEl ₃) = 6 padrões
Total de padrões QuickCast™ a serem construídos			18 Padrões

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO ENSAIADOS

01. Espessura de Parede do Padrão (EP) - Conforme comentado anteriormente, um padrão QuickCast™ consiste de uma casca ou superfície externa muito fina, a qual é estruturada internamente para dar sustentação à esta fina casca [37]. Esta superfície externa define a geometria do padrão e deve possuir uma espessura tal que seja suficientemente resistente para suportar as cargas à que estará sujeita (manipulação, formação da casca cerâmica) e ao mesmo tempo finas o suficiente para não exercerem tensões térmicas sobre o molde cerâmico durante as etapas do processo de microfusão. Foram testados três valores para este parâmetro 0.30, 0.45 e 0.60 mm.

02. Tipo de Estrutura Interna dos Padrões (TEI) - Este parâmetro está relacionado com o formato das células que compõem a malha da estrutura interna de um padrão QuickCast™. Este arranjo tridimensional de células fornece a robustez necessária para suportar as cargas impostas, principalmente, na etapa de formação do molde cerâmico, porém, frágil o suficiente para que, sob elevadas temperaturas, sua resistência seja inferior ao do molde cerâmico. Foram testadas as três configurações de estrutura interna possíveis de serem utilizadas com padrões QuickCast™: (i) triangular equilátera, (ii) quadrada e (iii) hexagonal.

03. Espaçamento da Estrutura Interna dos Padrões (EEI) - O espaçamento da estrutura interna dos padrões está relacionado com o tamanho das células com que os padrões QuickCast™ são construídos. Foram testados neste trabalho três valores para o

espaçamento interno obtendo-se padrões pouco espaçados ($EEI = 1.5\text{mm}$), medianamente espaçados ($EEI = 3.125\text{mm}$) e largamente espaçados ($EEI = 6.0\text{mm}$).

A seguir são mostrados os dados de *setup* utilizados na autoclave e forno de calcinação, os parâmetros de construção dos padrões, da casca cerâmica e a geometria da peça selecionada para experimento III:

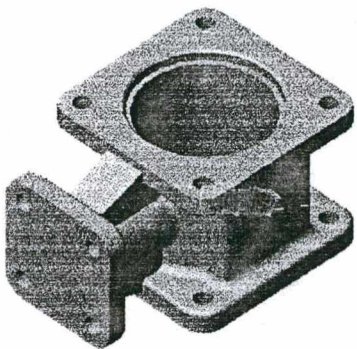
INFORMAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE MICROFUSÃO		
Material de fundição: Aço Inox 304		
Fator de contração: 1.6 % (nas direções X,Y e Z)		
Material do molde cerâmico: Silicato de Zircônio		
Número de camadas molde cerâmico: 12		
Tempo de secagem entre camadas: 6 à 8 horas		
PARÂMETROS AUTOCLAVE		
Temperatura: 100°C	Pressão: 10 bar	Tempo: 20 min
PARÂMETROS FORNO CALCINAÇÃO		
Temperatura: 1540°C	Oxigênio: não medida	Tempo: 1,5 horas
Temperatura de vazamento do Aço Inox 304: 1.620°C		
PARÂMETRO AVALIADO		
1. Espessura de Parede do Padrão QuickCast™		
Valores Testados Espessura de parede do padrão QuickCast™ $EP_{1,2} = 0.30\text{ mm}$ $EP_{3,4} = 0.45\text{ mm}$ $EP_{5,6} = 0.60\text{ mm}$		
Parâmetros de construção utilizados Espessura de camada: 0.15 mm Tipo de estrutura interna: Hexagonal Espaçamento da estrutura interna: 6.0 mm ϕ drenos: 5.0 mm ϕ respiros: 2.4 mm Fator de contração da resina SL5170: 0.05%		
Massa dos padrões M_{EP1} : 15,94 g M_{EP2} : 15,04 g M_{EP3} : 14,68 g M_{EP4} : 14,14 g M_{EP5} : 16,35 g M_{EP6} : 17,11 g	Taxa de vazios R_{vEP1} : 61,9% R_{vEP2} : 63,3% R_{vEP3} : 64,1% R_{vEP4} : 65,5% R_{vEP5} : 60,2% R_{vEP6} : 58,3%	Identificação Nome: Corpo de válvula Quantidade: 2 x 3 = 6

Tabela 10 - Parâmetros de construção utilizados no experimento III (continua)

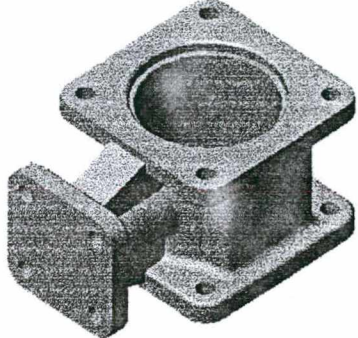
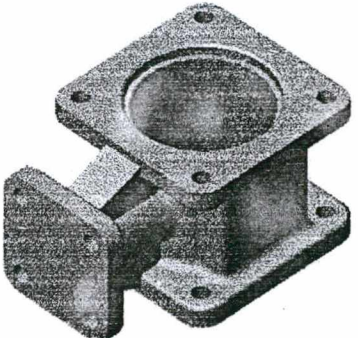
PARÂMETRO AVALIADO		
2. Tipo de estrutura interna do padrão QuickCast™		
Valores Testados Tipo de estrutura interna do padrão QuickCast™ TEI _{1,2} = Triangular TEI _{3,4} = Quadrada TEI _{5,6} = Hexagonal		
Parâmetros de construção utilizados Espessura de camada: 0.15 mm Espessura de parede: 0.25 mm Espaçamento da estrutura interna: 3.125 mm ϕ drenos: 5.0 mm ϕ respiros: 2.4 mm Fator de contração da resina SL5170: 0.05%		
Massa dos padrões M _{TEI1} : 17,34g M _{TEI2} : 18,22g M _{TEI3} : 14,76g M _{TEI4} : 14,68g M _{TEI5} : 14,29g M _{TEI6} : 13,88g	Taxa de vazios R _{v,TEI1} : 57,6% R _{v,TEI2} : 55,5% R _{v,TEI3} : 64,0% R _{v,TEI4} : 64,1% R _{v,TEI5} : 65,2% R _{v,TEI6} : 66,1%	Identificação Nome: Corpo de válvula Quantidade: 2 x 3 = 6
PARÂMETRO AVALIADO		
3. Espaçamento da Estrutura Interna do Padrão QuickCast™		
Valores Testados Espaçamento da estrutura interna do padrão QC EEI _{1,2} = 1.5 mm EEI _{3,4} = 3.125 mm (default) EEI _{5,6} = 6.0 mm		
Parâmetros de construção utilizados Espessura de camada: 0.15 mm Espessura de parede: 0.25 mm Tipo de estrutura interna: Hexagonal ϕ drenos: 5.0 mm ϕ respiros: 2.4 mm Fator de contração da resina SL5170: 0.05%		
Massa dos padrões M _{EEI1} : 24,57g M _{EEI2} : 23,03g M _{EEI3} : 13,55g M _{EEI4} : 14,90g M _{EEI5} : 11,27g M _{EEI6} : 12,19g	Taxa de vazios R _{v,EEI1} : 40,2% R _{v,EEI2} : 43,8% R _{v,EEI3} : 66,9% R _{v,EEI4} : 63,6% R _{v,EEI5} : 72,5% R _{v,EEI6} : 70,2%	Identificação Nome: Corpo de válvula Quantidade: 2 x 3 = 6

Tabela 10 - Parâmetros de construção utilizados no experimento III (continuação)

4.2.2 Segunda Fase: Fabricação de Insertos para Moldes de Injeção de Plásticos

Para a realização da parte experimental dos estudos de casos envolvendo a fabricação de insertos para moldes de injeção de plásticos foram estabelecidas duas geometrias de peças representativas do processo de moldagem por injeção (figuras 35 e 36). Para cada uma das geometrias foram construídos dois conjuntos de insertos (figuras 35e 36), dois machos e duas fêmeas idênticos, ou seja, cada padrão de inserto construído terá uma replicação.

Nesta fase de experimentos foram empregados parâmetros de construção e procedimentos de fundição que obtiveram os melhores resultados na primeira fase em termos de qualidade das peças fundidas, bem como, melhor rendimento na etapa de fundição. Os objetivos que se pretendem alcançar com os experimentos a serem realizados nos estudos de casos desta fase são:

- Avaliar o potencial de uso dos padrões QuickCast™ e do processo de microfusão na fabricação de insertos destinados ao processo de moldagem por injeção.
- Caracterizar a incerteza dimensional e rugosidade superficial dos insertos fabricados pela técnica *QuickCast tooling*.
- Avaliar sob critérios econômicos e de tempo a viabilidade de fabricar insertos para moldes pela técnica *QuickCast tooling*.
- Verificar o comportamento de queima dos padrões QuickCast™ através da alteração no processo tradicional de microfusão eliminando a etapa de deceramento.

4.2.2.1 GEOMETRIAS UTILIZADAS NOS ESTUDOS DE CASOS DE FERRAMENTAL RÁPIDO

➤ INSERTO TAMPA DE FRASCO PARA ESPUMA DE BARBEAR

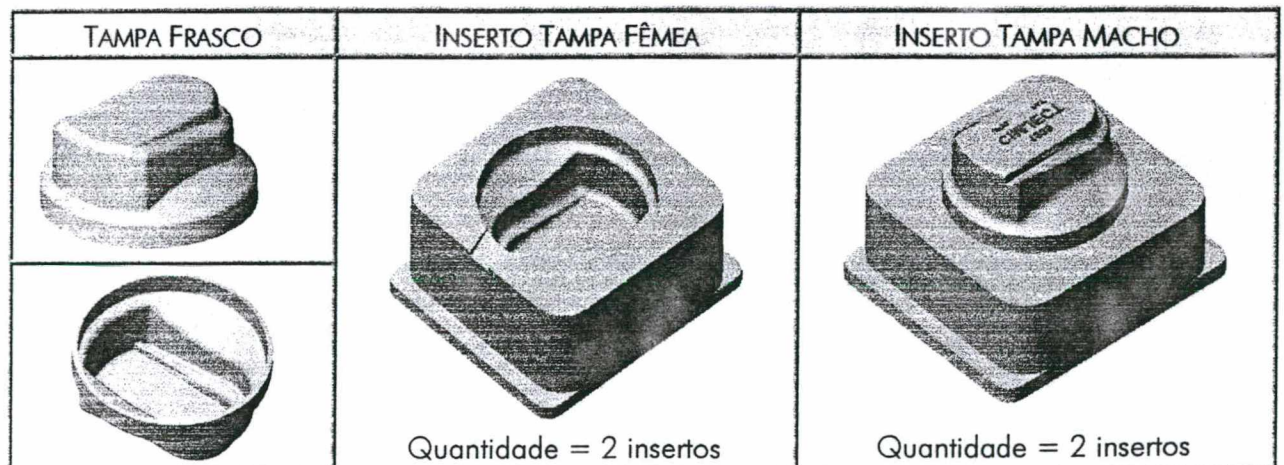


Figura 35 - Geometria dos insertos para a tampa do frasco de espuma de barbear.

➤ **INSERTO BOTÃO REGULADOR DE TEMPERATURA DE CONDICIONADOR DE AR**

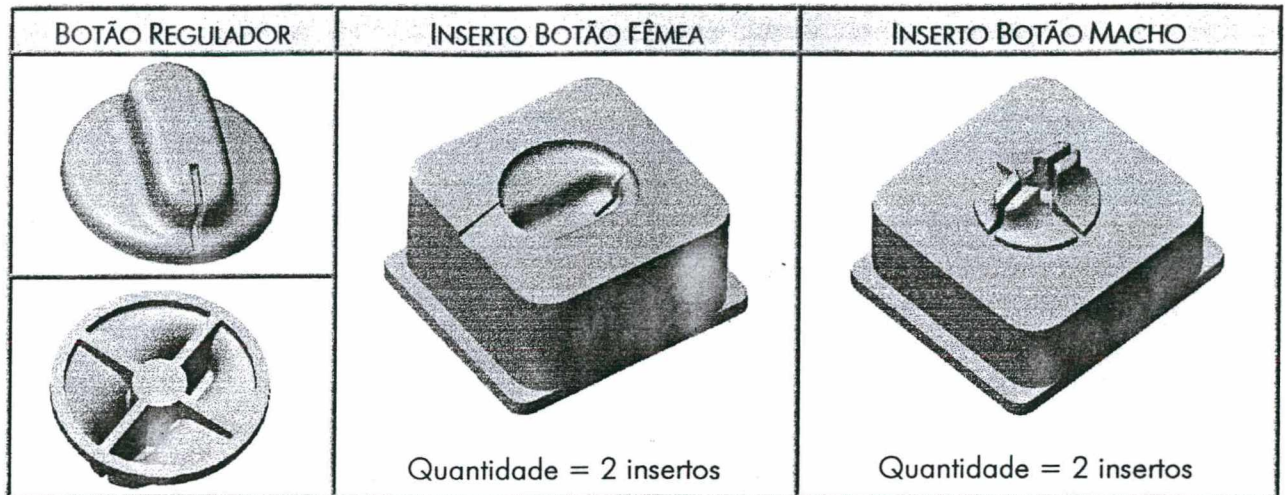


Figura 36 - Geometria dos insertos para o botão regulador de temperatura.

4.2.2.2 DEFINIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS EM FERRAMENTAL RÁPIDO

▪ **Estudo de Caso 1 : Eliminação da Etapa de Deceramento em Autoclave**

Um teste adicional, não realizado nos estudos de casos da primeira fase de experimentos, foi o de eliminar a etapa de deceramento em autoclave do processo de microfusão, já que é nesta etapa que ocorrem a maior parte das trincas e quebras da casca cerâmica. Certamente, um estudo mais detalhado dos fenômenos que ocorrem na etapa de deceramento seria mais indicado, porém, devido às limitações de tempo e custos para a realização de novos ensaios, aliado às dificuldades em alterar os parâmetros de funcionamento da autoclave, decidiu-se eliminar esta etapa numa tentativa de melhorar o rendimento na etapa de microfusão. Mais adiante neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e discutir-se-á as implicações desta decisão.

Para efeito de comparação, a outra árvore de cera com o segundo conjunto de padrões foi fabricada usando o método tradicional, isto é, incluindo todos os passos do processo inclusive a etapa de deceramento na autoclave.

▪ **Estudo de Caso 2 : Avaliação do Potencial de Uso das tecnologias de SL e Microfusão na Fabricação de Insertos para Moldes de Injeção de Plásticos**

Além dos testes anteriormente citados, dever-se-á realizar uma comparação, sob os pontos de vista técnico, econômico e de tempo, entre o método tradicional de fabricação de ferramentas e a técnica *QuickCast tooling*. Estes estudos de caso visam identificar os potenciais de redução de tempo e custos associados com esta nova técnica, ou mesmo identificar se existem realmente vantagens em relação ao método tradicional de fabricação de ferramentas dos pontos de vista de custos e de tempo de fabricação. Também pretende-se identificar e quantificar, os problemas associados com incertezas dimensionais e operações de acabamento superficial necessárias.

Na figura 37 é mostrada a geometria da árvore de cera utilizada e dos padrões *QuickCast™* dos insertos montados nesta árvore, utilizados no estudo de caso 2.

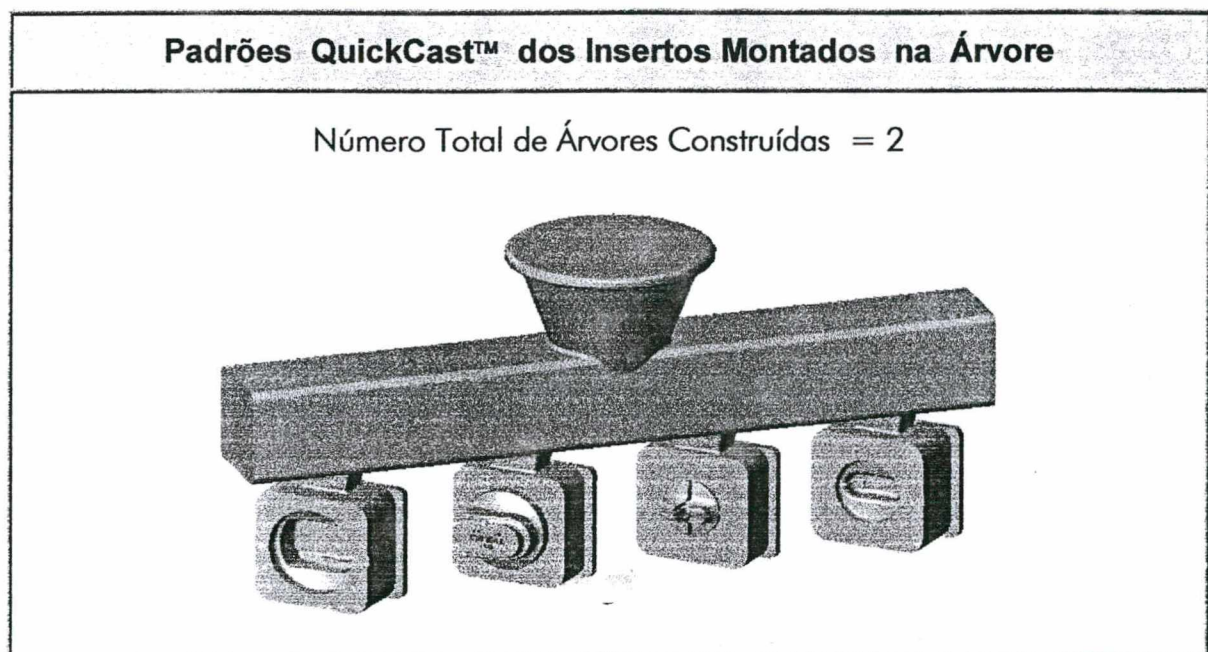


Figura 37 - Montagem dos padrões *QuickCast™* na árvore de cera.

4.2.2.3 PROJETO DO FERRAMENTAL QUICKCAST

➤ Preparação do Porta-Moldes

Com o intuito de reduzir o tamanho dos insertos *QuickCast* a serem fabricados e, assim, reduzir os custos de fabricação dos padrões reaproveitando um porta-moldes existente decidiu-se fabricar uma camisa porta-insertos que alojará os dois insertos *QuickCast™* e será montada na placa porta-cavidades conforme mostrado na figura 38.

NÃO

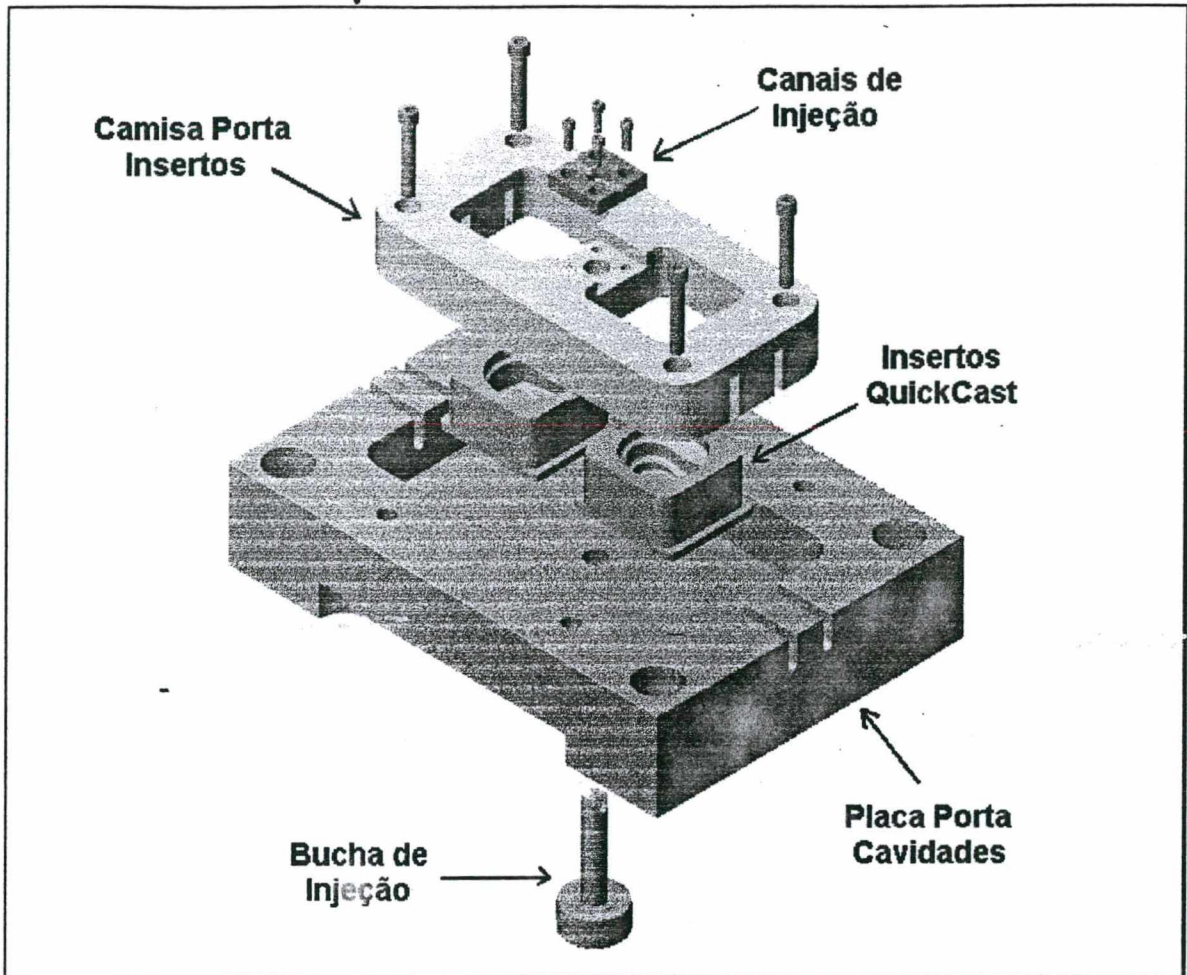


Figura 38 - Preparação do porta-moldes utilizado

➤ Sistemas de Alimentação, Extração e Refrigeração

O uso de um porta-moldes já existente impõe uma série de limitações ao projeto do molde que será construído. Quanto ao sistema de alimentação de material plástico para o interior da cavidade, a localização do ponto de injeção teve que ser alterada de uma posição superior recomendada [57,61,71] (figura 39) para uma posição lateral na peça (figura 40), pois o molde original já possuía esta configuração.

As conseqüências desta alteração de projeto são: o possível surgimento de linhas de solda na extremidade oposta ao ponto de injeção conforme pode ser observado na simulação feita no software 3DQuickFill™ mostrada na figura 40, bem como locais com possível aprisionamento de ar e prejuízo à transparência da peça devido à orientação molecular imposta pelo novo caminho de fluxo. Entretanto, para os objetivos propostos nesta pesquisa esta limitação não influencia os resultados que se pretende alcançar.

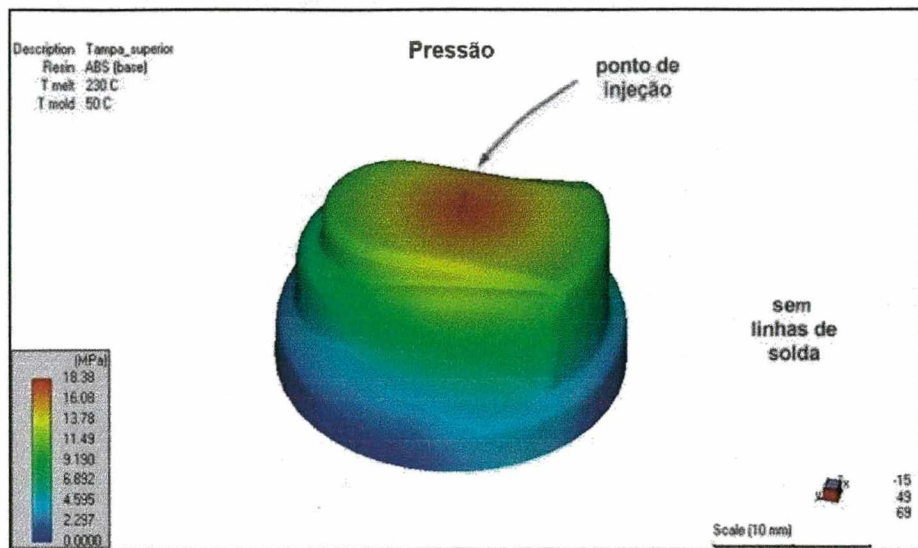


Figura 39 - Localização do ponto de injeção recomendada: superior

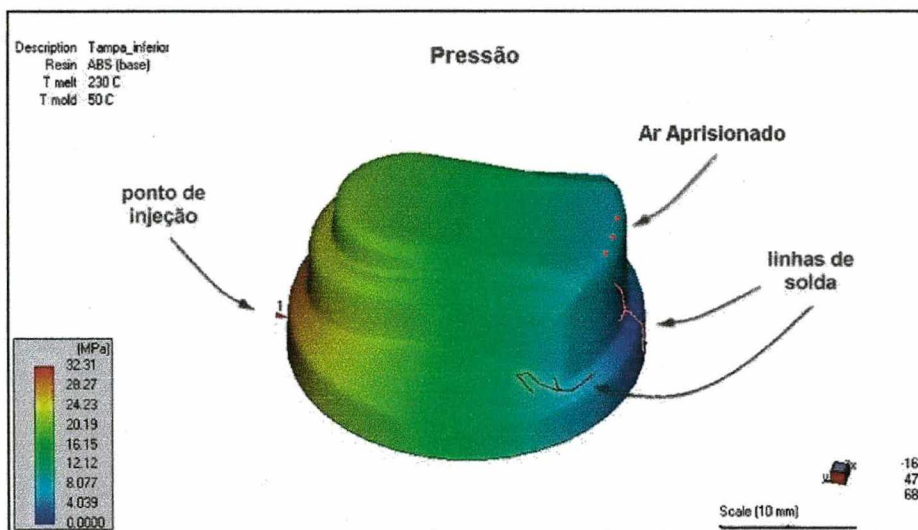


Figura 40 - Localização do ponto de injeção pré-determinada: lateral

Uma outra limitação imposta pela utilização do porta-moldes já existente é quanto ao posicionamento dos pinos extratores e aos canais de refrigeração. Infelizmente para as duas peças selecionadas para os estudos de caso não foi possível aproveitar o posicionamento dos pinos extratores da peça original, pois sua localização não coincide com a posição da nova peça a ser moldada.

O dimensionamento dos canais de alimentação e do canal de injeção seguiu a orientação de [61,71], onde o diâmetro dos canais de alimentação é dado por:

$$D = S_{MAX} + 1.5 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Onde, D é o diâmetro do canal e S_{MAX} é a máxima espessura da peça. O ponto de injeção adotado foi em forma de leque (*edge ou fan gate*) com:

$$H = (0.2 \text{ a } 0.7) \cdot S_{MAX} \quad (4.2)$$

$$L = (0.5 \text{ a } 2.0) \text{ mm} \quad (4.3)$$

Sendo H e L a altura e a largura, respectivamente, do ponto de injeção em forma de leque. A figura 41 ilustra um detalhe do sistema de alimentação utilizado.

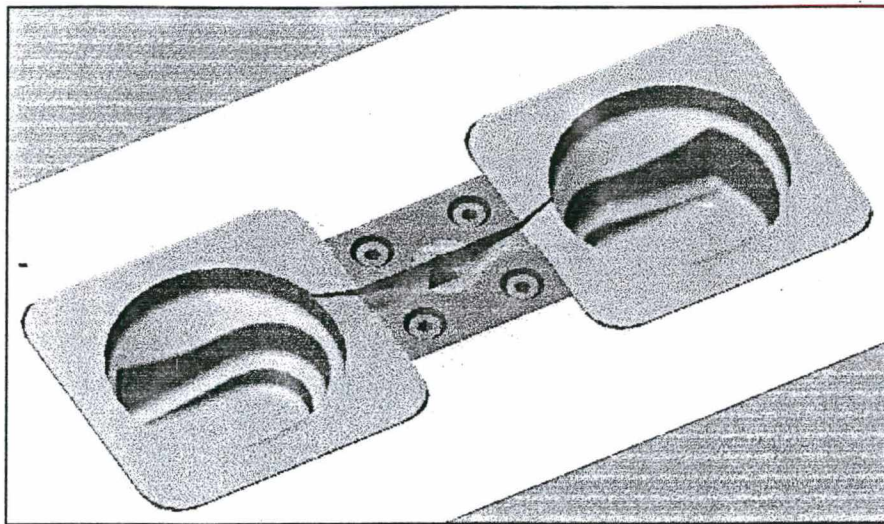


Figura 41 – Detalhe do sistema de alimentação de plástico para as cavidades.

➤ Dimensões e Fatores de Contração

Para o cálculo das dimensões com as quais os padrões QuickCast™ dos insertos devem ser modelados no CAD, todos os fatores de compensação da contração existentes nas diversas etapas do processo de fabricação foram calculados e considerados. Estes fatores são os seguintes:

1. Contração da resina epóxi durante a fabricação dos padrões QuickCast™, $Contr_{SL}$.
2. Contração devido ao resfriamento do metal durante a etapa de microfusão, $Contr_{MET}$.
3. Contração do material plástico no interior da cavidade durante a etapa de moldagem por injeção, $Contr_{PLAST}$.

Portanto, o fator de correção global da contração a ser aplicado durante o modelamento dos insertos será o somatório dos fatores de contração individuais de cada etapa, conforme mostrado na equação 4.4.

$$\text{Contr}_{\text{GLOBAL}} = \text{Contr}_{\text{SL}} + \text{Contr}_{\text{MET}} + \text{Contr}_{\text{PLAST}} \quad (4.4)$$

É importante observar que um fator de compensação da contração isotrópico, ou seja, idêntico nas direções X, Y e Z foi utilizado nestes experimentos. Como será discutido mais adiante neste capítulo, os fenômenos de contração dos materiais existentes nas diversas etapas do processo de fabricação, são um dos fatores que mais contribuem para o aumento da incerteza dimensional nesta técnica de *rapid tooling*. A tabela 11 apresenta os valores dos fatores de correção da contração utilizados nos estudos de caso:

Tabela 11 – Fatores de contração utilizados nos estudos de casos de ferramental rápido.

ETAPA	Fator Contração RESINA SL5170	Fator Contração Metal AÇO SAE 8640	Fator Contração Plástico ABS
Estereolitografia Contr _{SL}	0.05 %	-- x --	-- x --
Microfusão Contr _{MET}	-- x --	1.6 %	-- x --
Injeção Contr _{PLAST}	-- x --	-- x --	0.6 %
Fator de Contração Global			
$\text{Contr}_{\text{GLOBAL}} = 0.05 + 1.6 + 0.6 = 2.25 \%$			

➤ Acabamento Superficial dos Insertos

Devido ao efeito “degraus de escada” resultante do processo de fabricação por camadas, bem como pela remoção dos suportes na superfície inferior dos padrões QuickCast™, estes devem passar por uma operação de acabamento superficial antes de serem enviados para o processo de microfusão, pois, do contrário, toda e qualquer imperfeição existente na superfície do padrão revelar-se-á também na peça fundida.

Além do acabamento necessário nos padrões QuickCast™, a superfície microfundida dos insertos metálicos também deverá receber tratamento superficial para que as peças injetadas possuam bom aspecto estético, bem como para facilitar a desmoldação. Operações de pós-processamento dos insertos fundidos visando o ajuste e montagem no porta-moldes deve envolver também operações de desempenamento e

faceamento das paredes laterais com a medida necessária para encaixarem-se na camisa porta-insertos mostrada na figura 38. As zonas moldantes, entretanto, receberam apenas acabamento superficial manual, de maneira semelhante à tradicionalmente realizada na fabricação por usinagem.

Pesquisas realizadas no GeorgiaTech Institute [8] investigaram diversas técnicas de acabamento superficial de insertos em resina epóxi fabricados por estereolitografia incluindo: lixamento, polimento, jateamento em areia, acabamento por vibração, concluindo que o polimento com pasta abrasiva é o método que melhores resultados oferece.

Para o acabamento superficial dos **padrões QuickCast™** foram utilizadas, inicialmente, lixas de papel com granulometrias progressivamente mais finas (#220, #280, #320, #400 e #600). Após a operação de lixamento foi executado um polimento com pasta abrasiva de granulometria #600 nas zonas moldantes dos padrões.

O acabamento superficial dos **insertos metálicos fundidos** foi executado igualmente utilizando lixas de papel com granulometrias de #150, #220, #280, #320 e #400 e, posteriormente utilizou-se pasta abrasiva com granulometrias de #400, #600 e #800.

➤ **Parâmetros de Construção dos Padrões QuickCast™ Utilizados**

Os parâmetros de construção que serão utilizados nos estudos de caso de *rapid tooling* foram obtidos dos ensaios realizados na primeira fase experimental. Foram utilizados os parâmetros de construção e condições do processo que obtiveram os melhores resultados em termos de comportamento de queima e qualidade das peças fundidas.

➤ **Etapa de Microfusão**

De maneira geral os passos utilizados na etapa de microfusão são semelhantes àqueles usados nos estudos de caso da primeira fase de experiências. Entretanto, como observado anteriormente decidiu-se testar uma alteração no processo de microfusão: uma das cascas cerâmicas contendo a árvore de cera com os padrões QuickCast™ foi colocada diretamente no forno de calcinação sem passar pela etapa de deceramento em autoclave. A outra casca seguiu os passos normais do processo de microfusão. Os resultados deste teste serão discutidos mais adiante neste capítulo. Resumidamente, os seguintes parâmetros de queima foram utilizados no processo de microfusão para esta segunda fase:

Tabela 12 – Parâmetros do processo de microfusão utilizados nos estudos de casos I e II.

Parâmetros do Processo de Microfusão	
A) CONSTRUÇÃO DO MOLDE CERÂMICO	
Número de camadas do molde cerâmico	12 camadas
Tempo de secagem entre camadas consecutivas	6 à 8 horas
Material de construção do molde cerâmico	Silicato de zircônio
B) ETAPA DE DECERAMENTO NA AUTOCLAVE	
Temperatura no interior da autoclave	100°C
Pressão no interior da autoclave	10 bar
Tempo de deceramento	20 min
C) ETAPA DE CALCINAÇÃO DO MOLDE CERÂMICO	
Material a ser fundido	Aço SAE 8640
Temperatura de vazamento	1640°C
Temperatura do forno de calcinação	1540°C
Tempo de calcinação do molde cerâmico	1,5 horas
Tipo de resfriamento das peças fundidas	Ar → Água

4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ADOTADOS

4.3.1 Fabricação dos Padrões QuickCast™

4.3.1.1 MODELAMENTO CAD 3D

A primeira etapa no processo de fabricação de um padrão QuickCast™ destinado ao processo de microfusão é a etapa de CAD. Conforme discutido no capítulo II, item 2.4, o objeto a ser construído deve ser representado como superfícies fechadas. Este requisito assegura que todas as seções transversais são linhas fechadas que criam um objeto sólido [3]. A figura 42 ilustra o modelo CAD tridimensional da peça corpo de válvula.

Durante esta etapa foram incorporados ao modelo CAD dos padrões todos os fatores de compensação da contração existentes no processo, bem como procurou-se seguir as regras ou recomendações de projeto de peças destinadas ao processo de microfusão. Para o modelamento tanto das peças como dos insertos foi utilizada uma plataforma CAD baseada em modelamento de sólidos. O software CAD utilizado foi o SolidWorks®99 – SolidWorks Corporation.

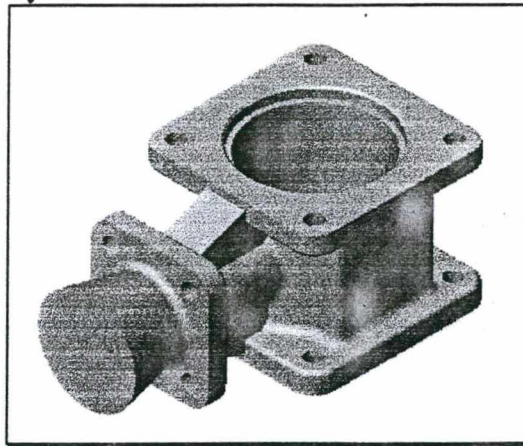


Figura 42 - Modelo CAD 3D de uma peça, construída em modelador de sólidos

4.3.1.2 TRADUÇÃO DOS DADOS CAD PARA O FORMATO .STL

Uma vez que as peças foram modeladas, executou-se a tradução do arquivo CAD para o formato triangularizado (.STL) que será utilizado na próxima etapa pelo software de preparação e geração do programa de comando numérico que orientará a fabricação das peças na máquina de estereolitografia. Os parâmetros de exportação para o formato .STL foram os mesmos para todas as peças e insertos. Procurou-se utilizar parâmetros suficientemente refinados para que a influência desta etapa sobre a incerteza dimensional fosse mínima.

A figura 43 apresenta uma tabela das tolerâncias utilizadas para conversão para o formato .STL.

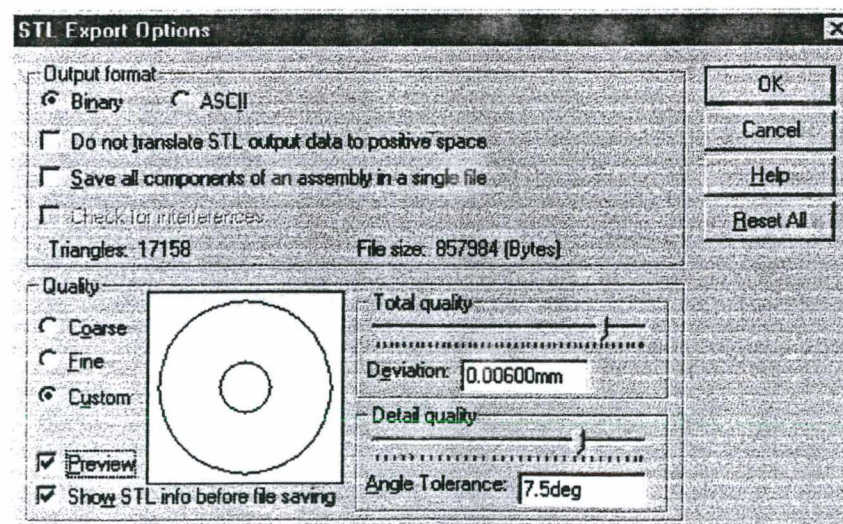


Figura 43 - Tolerância para conversão do arquivo CAD 3D para o formato STL.

4.3.1.3 ORIENTAÇÃO DAS PEÇAS PARA CONSTRUÇÃO

A etapa de orientação influencia de forma significativa na qualidade superficial das peças, já que, devido à característica de fabricação por camadas, superfícies inclinadas produzem um efeito chamado “degraus de escada” que são difíceis de serem removidos, requerendo mais tempo em acabamento superficial e, principalmente, influenciando na precisão dimensional das peças. No item 2.3.4, capítulo II, estão descritos alguns requisitos e sugestões para obtenção de melhores resultados nesta etapa de preparação para a fabricação dos padrões para fundição. A figura 44 ilustra três possíveis orientações para construção do corpo de válvula. A orientação selecionada para a construção dos padrões utilizados no experimento III está destacada na figura 44.

4.3.1.4 GERAÇÃO DOS SUPORTES PARA A CONSTRUÇÃO DAS PEÇAS

O processo de estereolitografia é um dos processos de prototipagem rápida que exige a colocação de suportes para construção de seus objetos. Esta operação é executada “automaticamente” pelo software de preparação e geração do programa de comando numérico (Maestro[®] Workstation), requerendo, eventualmente, uma posterior edição dos suportes tanto para reforçar certas regiões, como para suprimir suportes em outras.

As principais razões para estas exigências são descritas no item 2.3.5 no capítulo II. A figura 44 ilustra o posicionamento dos suportes para três possíveis orientações para a construção da peça corpo de válvula.

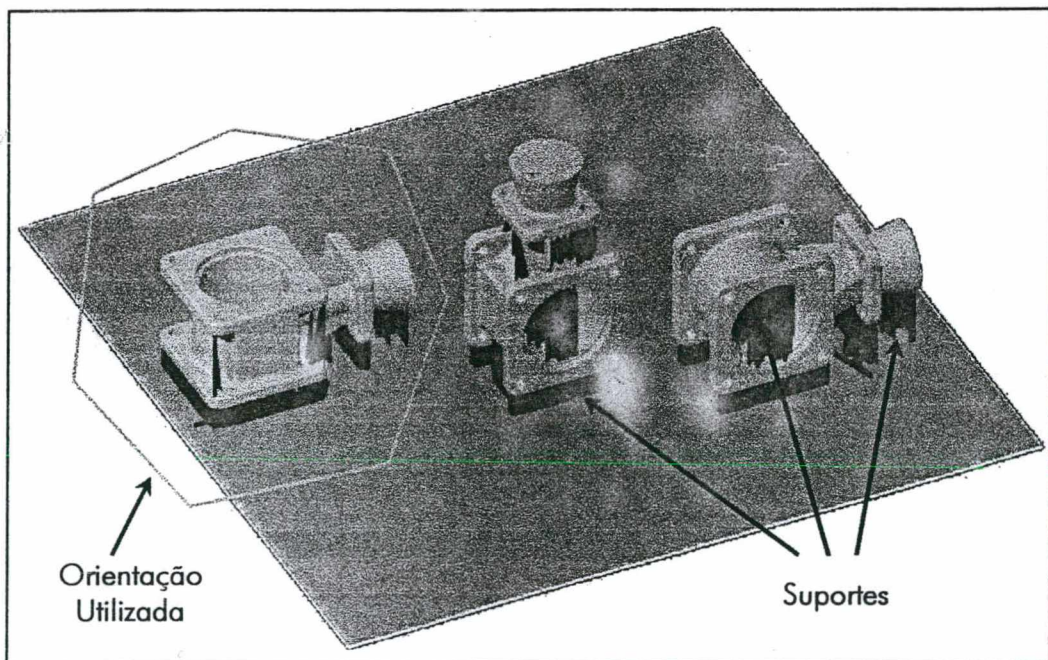


Figura 44 - Posicionamento dos suportes fixando as peças à plataforma de construção

4.3.1.5 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DOS PADRÕES QUICKCAST™

Os parâmetros de construção desenvolvidos para o processo de estereolitografia nada mais são do que uma lista de informações que são usadas durante o processo de fatiamento e geração do programa de comando numérico para construir objetos com diferentes características, propriedades e aplicações [1,36].

Neste trabalho, com exceção aos parâmetros que serão avaliados, foram usados parâmetros de construção recomendados pelo fabricante da resina fotopolimérica, sendo estes mantidos constantes para todos os padrões QuickCast™ construídos. Uma lista típica de parâmetros é mostrada na tabela 13. As áreas hachuradas em cinza correspondem aos parâmetros de construção que foram utilizados nos estudos de casos em ferramental rápido (parâmetros que forneceram melhores resultados).

Tabela 13 - Parâmetros de construção utilizados nos estudos de casos de rapid tooling.

PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO	
Resina: CIBATOOL SL 5170 Estilo: QUICKCAST™ Máquina: SLA 250/30A	
Layer Thickness (espessura de camada)	0.15 mm
Hatch Type (tipo de estrutura interna)	Hexagonal
Hatch Spacing (espaçamento da estrutura interna)	5.0 mm
Layer Offset Depth	Não aplicável
Hexagon Transition Depth	3.150 mm
Hexagon Bonding Depth	0.450 mm
Thick Skins (habilitar construção de padrões com paredes grossas)	ON
Minimum Skin Width (espessura mínima de parede do padrão)	0.45 mm
Fill Type	X & Y
Fill Spacing	0.10 mm
Border Overcure	0.175 mm
Hatch Overcure	0.175 mm
Fill Cure Depth	0.225 mm
Beam Compensation	ON
Beam Compensation Value	0.15 mm
Auto Zcorrect	ON
Minimum Width for Fills	0.10 mm
Additional Boundaries	2
Boundary Compensation	0.050 mm
Vent Radius (raio dos respiros)	1.00 mm
Drain Radius (raio dos drenos)	2.5 mm
Drain Spacing (espaçamento entre drenos)	30 mm
Recommended X&Y Shrink Factor (fator de compensação da contração da resina no plano XY)	0.05 %

4.3.1.6 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS NA MÁQUINA DE ESTEREOLITOGRAFIA

Após a seleção dos parâmetros de construção e fatiamento do modelo eletrônico, um programa de comando numérico foi gerado para orientar a fabricação dos padrões QuickCast™. Para construir estes padrões foi utilizada uma máquina de estereolitografia, modelo SLA 250/30A, fabricada pela empresa norteamericana 3D Systems Inc. O volume de trabalho deste equipamento é de 250x250x250 mm³ sendo equipado com laser de He-Cd cujo comprimento de onda é de 325 nm e potência nominal de 30 mW. A resina usada na fabricação dos padrões foi a SL 5170, uma resina a base de epóxi fabricada pela Ciba-Especialidades Químicas.

A figura 45 mostra uma fotografia da máquina de estereolitografia empregada para construir os padrões QuickCast™ utilizados na pesquisa.

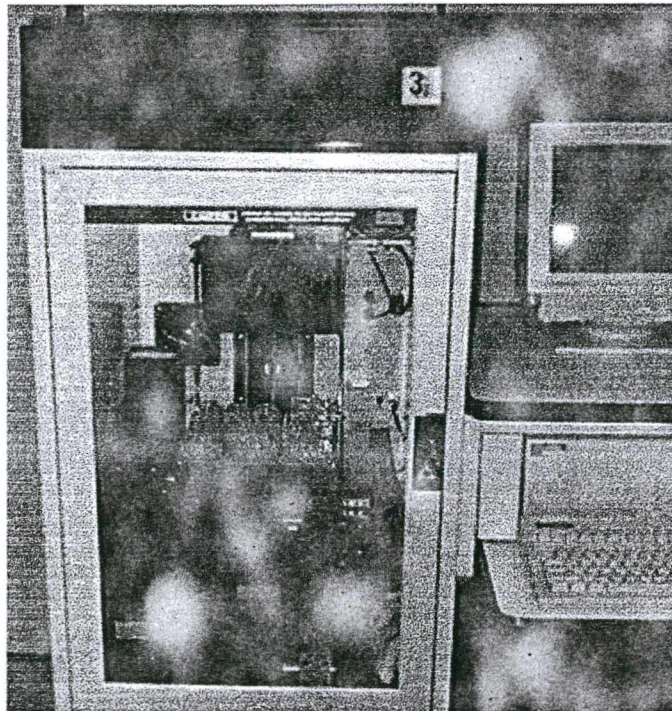


Figura 45 - Fotografia da SLA250/30A após término da construção dos padrões.

4.3.1.7 DRENAGEM E LIMPEZA DOS PADRÕES QUICKCAST™

Depois de terminada a construção das peças, um tempo é reservado para que a resina líquida seja drenada do interior dos padrões. Em média o tempo fixado para o término da drenagem foi de 2 a 3 horas, quando a construção terminava durante o dia. Caso terminasse à noite, os padrões permaneciam no interior da máquina por períodos maiores, geralmente, não ultrapassando 8 horas. O critério para retirada das peças da máquina foi a cessação do gotejamento. Assim que se verificou que a resina líquida parou de gotejar, as

peças foram removidas da máquina e submetidas às etapas de limpeza e pós-cura. A etapa de limpeza dos padrões consistiu, basicamente, das seguintes tarefas:

- i. retirada dos padrões presos à plataforma pelos suportes.
- ii. retirada dos suportes que permaneceram presos aos padrões. Em geral os suportes foram construídos utilizando estruturas semelhantes a dentes de serra na interface entre os suportes e a superfície do padrão. Isto facilitou a sua retirada reduzindo os riscos de perfurações.
- iii. limpeza do excesso de resina líquida que permaneceu sobre a peça. Para evitar possíveis distorções nos padrões construídos decidiu-se não utilizar solventes para executar a limpeza. Os padrões foram limpos utilizando apenas toalhas de papel absorvente.

4.3.1.8 PÓS-CURA DOS PADRÕES QUICKCAST™

Depois de removidos os suportes e executada a limpeza, procedeu-se uma etapa de pós-cura por radiação ultravioleta em uma câmara (figura 46) que foi construída na própria Universidade Federal de Santa Catarina com recursos disponibilizados pelo PAT. Esta etapa consistiu em colocar os padrões QuickCast™ no interior desta câmara e teve o objetivo de completar a polimerização da resina líquida que não foi curada pelo laser durante a construção pela máquina. O tempo de exposição à radiação depende de fatores como a massa e a taxa volume/superfície da peça. Como os padrões QuickCast™ são parcialmente ocos, o tempo requerido para completar a cura é bastante reduzido em relação às peças fabricadas usando o estilo sólido. Em geral, as peças ficaram expostas à uma radiação U.V por um período de 60 minutos.

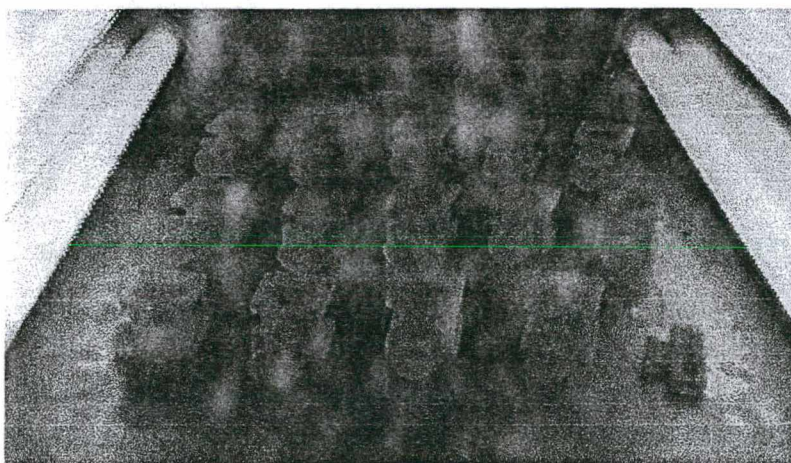


Figura 46 – Etapa de pós-cura em câmara de radiação ultravioleta.

4.3.1.9 MEDIÇÕES E PESAGEM DOS PADRÕES QUICKCAST™

Assim que os padrões eram retirados da câmara de pós-cura, cada padrão foi pesado visando o cálculo da taxa de vazios (R_V), equação 3.1, uma das variáveis utilizadas neste trabalho para avaliar a eficiência na operação de drenagem dos padrões QuickCast™. Em seguida os padrões eram medidos para uma futura análise dimensional acerca da fabricação de protótipos metálicos por microfusão utilizando padrões de estereolitografia.

4.3.1.10 PREPARAÇÃO DOS PADRÕES PARA O PROCESSO DE MICROFUSÃO

A última etapa de fabricação dos padrões QuickCast™ foi o fechamento dos furos referentes aos drenos e respiros construídos para drenagem da resina líquida do interior do padrão. Estes furos devem obrigatoriamente ser cobertos para evitar que o material cerâmico utilizado na formação da casca cerâmica penetre no interior do padrão. Dois materiais foram utilizados e testados para assegurar a hermeticidade dos padrões. Inicialmente utilizou-se cera de fundição (experimento I) e posteriormente (experimento III) uma cola adesiva à base de epóxi (Araldite®). A figura 47 ilustra o padrão QuickCast™ da peça corpo de válvula antes de ser enviado para a etapa de microfusão.

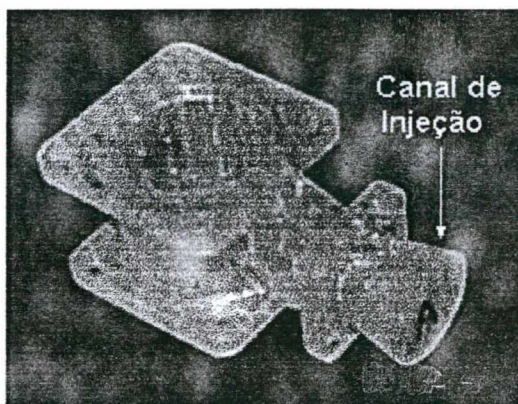


Figura 47 – Padrão QuickCast™ pronto para ser enviado para a fundição.

4.3.2 Fabricação por Microfusão Utilizando Padrões QuickCast™

4.3.2.1 MONTAGEM DOS PADRÕES QUICKCAST™ NAS ÁRVORES DE CERA

Depois de cobertos todos os furos referentes aos drenos e respiros, iniciou-se a montagem dos padrões nas árvores de cera, conforme ilustram os passos da figura 48a-c. Esta operação consistiu na colagem dos padrões QuickCast™ à árvore de cera, mergulhando o canal de injeção do padrão em cera derretida e posicionando-o sobre uma das faces da árvore de cera.



Figura 48 – Montagem dos padrões Quickcast™ nas árvores de cera.

- (a) Canal de injeção do padrão Quickcast™ mergulhado na cera líquida.
- (b) Colagem dos padrões na árvore de cera
- (c) Padrões QuickCast™ montados nas árvores

4.3.2.2 CONSTRUÇÃO DO MOLDE CERÂMICO

Para a construção do molde cerâmico, a montagem árvore/padrões foi mergulhada em uma suspensão líquida contendo um material refratário e, subseqüentemente, recoberta com uma fina camada de pó cerâmico, no caso, uma composição de sílica e zirconita, que adere à suspensão previamente aplicada formando um invólucro muito resistente. O conjunto foi então colocado em uma estufa com temperatura e umidade controladas para permitir a secagem do material refratário. Este ciclo de secagem consumiu um tempo de aproximadamente 6 a 8 horas.

Depois que a primeira cobertura foi aplicada, outras camadas foram adicionadas usando o material de pré-cobrimento e pós refratários com tamanhos de grão sucessivamente maiores para a composição da casca cerâmica final. Em geral, quando se

está usando padrões QuickCast™ recomenda-se utilizar duas ou três camadas adicionais de material refratário por conta do maior coeficiente de expansão térmica da resina de SL. No experimento I foram utilizadas 10 camadas de material refratário para construir a casca cerâmica e no experimento III utilizou-se 12 camadas para cada árvore. As figuras 49 a-d ilustram os passos do processo de formação da casca cerâmica.

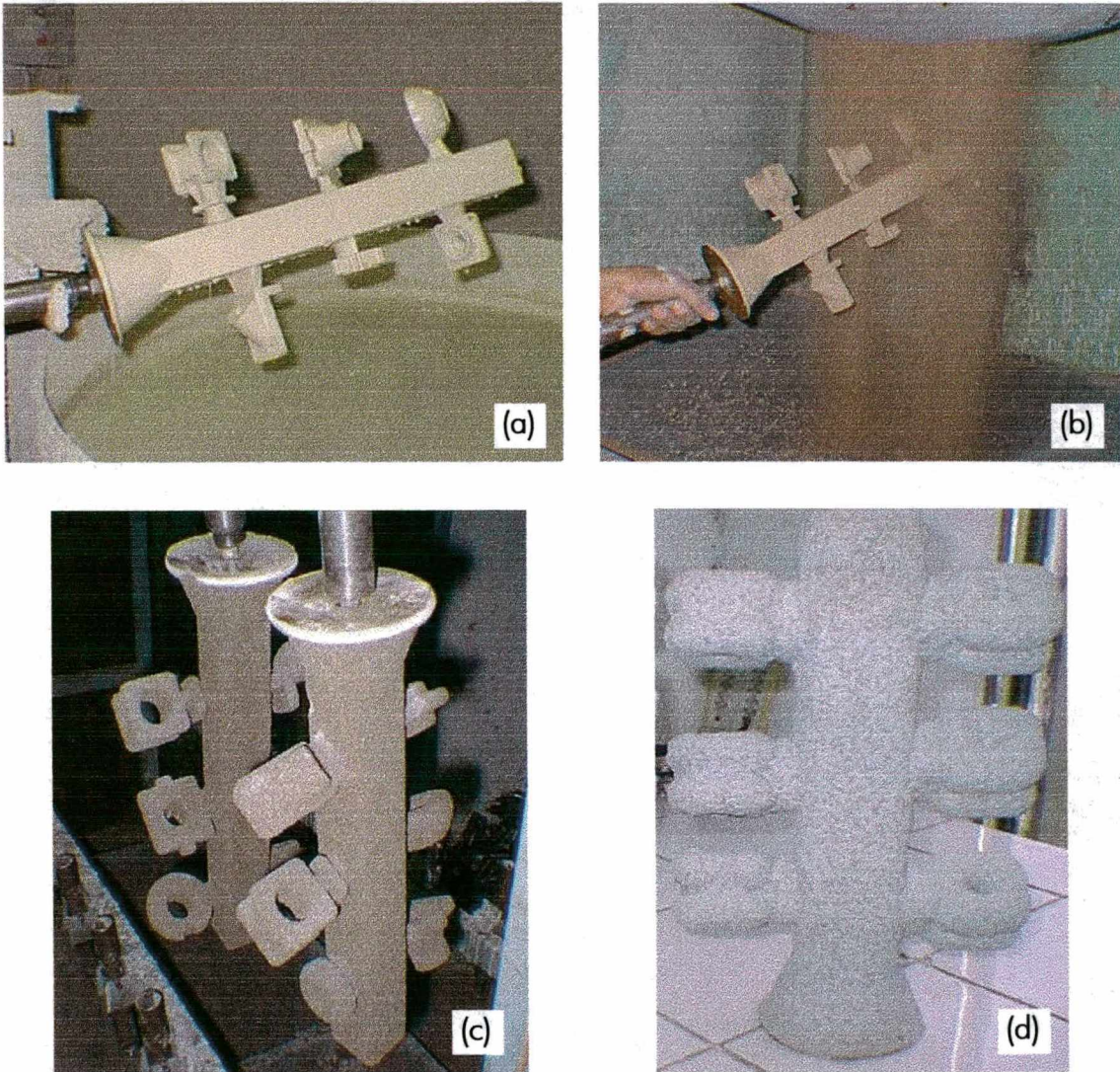


Figura 49 - Passos do processo de construção do molde cerâmico.

- (a) O conjunto árvore-padrões são mergulhados no material de pré-cobrimento*
- (b) Aspersão de pó refratário sobre o material de pré-cobrimento*
- (c) Molde cerâmico após aplicação de algumas camadas de material refratário*
- (d) Casca cerâmica completa, pronta para ser enviada para a etapa de deceramento*

4.3.2.3 DECERAMENTO EM AUTOCLAVE

Depois da aplicação da última camada de material cerâmico, o molde contendo a árvore de cera e os padrões QuickCast™ foi deixado secar por um período de aproximadamente 12 horas, quando, então, foi enviado para a etapa de deceramento. Esta etapa é responsável pela remoção da maior parte da cera do interior do molde cerâmico, tendo sido executada em uma autoclave que utiliza vapor à alta pressão e alta temperatura para derreter a cera da árvore, removendo-a de dentro do molde. Entretanto, os padrões QuickCast™ não são queimados durante esta etapa, mas sim na etapa de queima ou calcinação do molde cerâmico. Os valores de temperatura e pressão utilizados durante esta etapa foram os seguintes:

Temperatura na autoclave : 100 à 120°C
- Pressão de vapor na autoclave : de 8 à 10 bar
Tempo de deceramento : de 15 à 20 minutos

4.3.2.4 QUEIMA DOS PADRÕES E CALCINAÇÃO DO MOLDE CERÂMICO

Após a remoção da cera do interior do molde cerâmico, iniciou-se a etapa de queima dos padrões QuickCast™ que permaneceram no interior da casca cerâmica. Isto foi feito em um forno de calcinação onde todos os experimentos foram realizados utilizando os seguintes parâmetros:

⇒ Temperatura no interior do forno de calcinação = 1540°C
⇒ Tempo de Calcinação : 60 minutos
⇒ Temperatura de vazamento do AÇO INOX 304 = 1620°C
⇒ Temperatura de vazamento do AÇO SAE 8640 = 1640°C

As figuras 50-a,b ilustram a colocação do molde cerâmico contendo os padrões QuickCast™ no interior do forno e a operação de vazamento do metal líquido para o interior do molde, respectivamente.

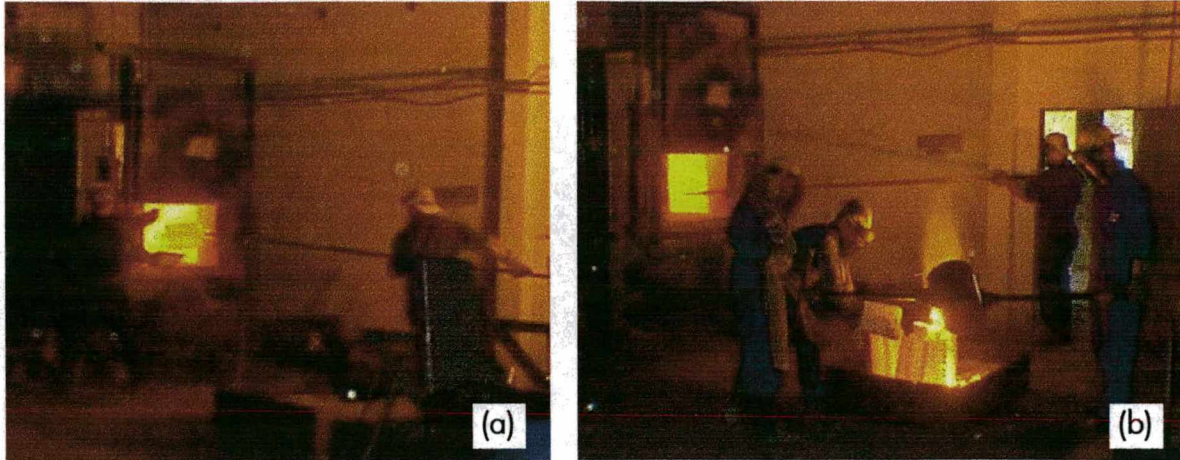


Figura 50 - Etapa de queima dos padrões QuickCast™ e calcinação do molde cerâmico

(a) Molde cerâmico sendo colocado no forno de calcinação

(b) Vazamento do metal líquido para dentro dos moldes cerâmicos

4.3.2.5 RESFRIAMENTO DAS PEÇAS FUNDIDAS E QUEBRA DA CASCA CERÂMICA

Terminado o vazamento, o metal foi resfriado até solidificar-se, adquirindo a forma imposta pela cavidade do molde. Neste trabalho as peças inicialmente foram resfriadas ao ar, durante aproximadamente 20 à 30 minutos, sendo o término do resfriamento realizado em água, seguindo recomendações adotadas pela empresa PRECICAST – Fundição de Precisão Ltda.

As figuras 51a-b ilustram a etapa de resfriamento e quebra da casca cerâmica.

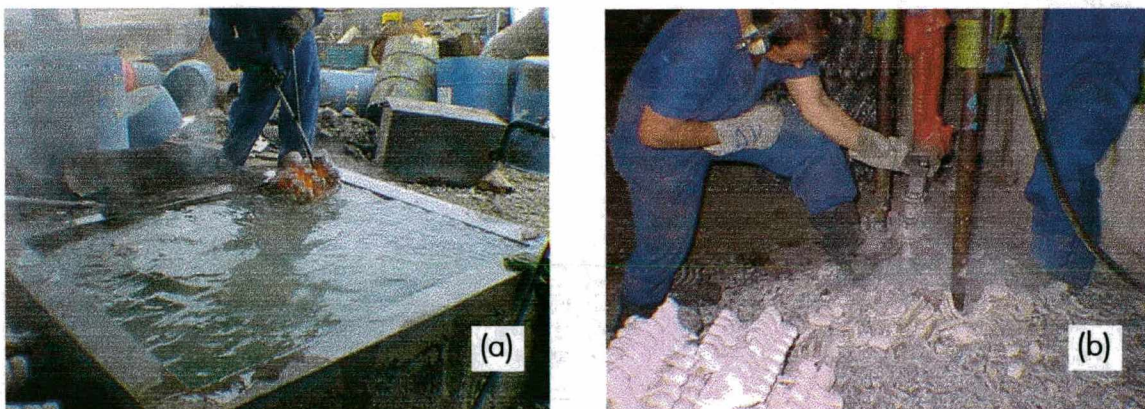


Figura 51 - Etapa de resfriamento das peças fundidas e quebra da casca cerâmica

(a) Resfriamento em água

(b) Quebra da casca cerâmica

4.3.2.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL DAS PEÇAS FUNDIDAS

Nesta última etapa do processo, as peças fundidas foram separadas dos canais de alimentação com um disco de corte ou uma serra. As rebarbas deixadas pela remoção dos canais de alimentação foram retificadas próximo à peça. Finalmente, as peças foram jateadas para a remoção do material cerâmico que permaneceu aderido às paredes ou em furos nas peças fundidas.

A figura 52 mostra uma fotografia das peças fundidas no experimento I.

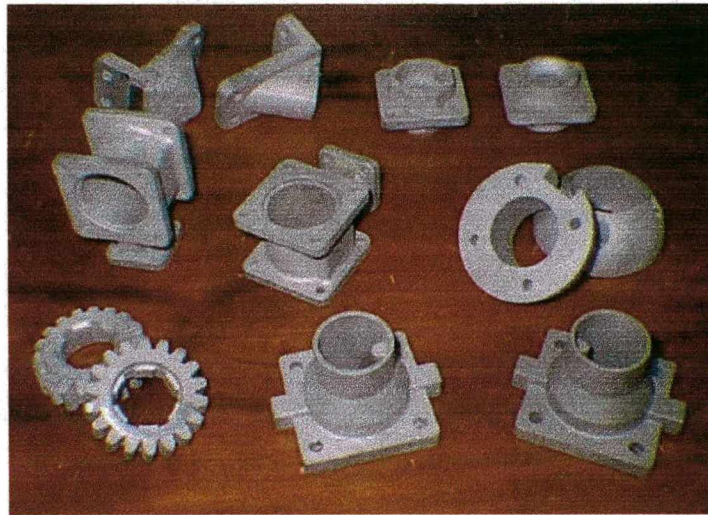


Figura 52 - Peças fundidas após acabamento com jateamento de areia.

Capítulo

5

Resultados Obtidos**5.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS****5.1.1 Critérios para Avaliação dos Resultados da Primeira Fase de Experimentos**

A avaliação dos resultados de cada etapa de ensaios da primeira fase baseou-se na análise dos relatórios gerados na etapa anterior. Estes relatórios contêm informações sobre os parâmetros utilizados tanto para a construção dos padrões *QuickCast™*, como para os do processo de fundição (ver tabela 29 Anexo B). Também deverão conter informações qualitativas e quantitativas sobre as peças fundidas como a análise dimensional, de rugosidade superficial e a indicação de defeitos ou problemas ocorridos durante a fundição, através de uma inspeção visual das peças fundidas. A programação de novos ensaios deverá ser realizada com base nestes relatórios parciais e nos resultados obtidos.

Para que se pudesse discutir os resultados alcançados nos experimentos realizados, tornou-se necessário definir um critério para aceitação ou rejeição de uma peça fabricada pelo processo de microfusão, ou seja, teve-se que definir um padrão de qualidade que permitisse classificar as peças fundidas. Para estabelecer este padrão utilizou-se como base a norma DIN 1680/Parte2 [65] que estabelece alguns critérios os quais permitem qualificar uma peça microfundida. Entre os critérios estão a avaliação das tolerâncias dimensionais e geométricas, padrões para inspeção visual e acabamento superficial e limites para porosidade superficial das peças fundidas. Estas especificações estão descritas no Anexo A. Os pontos de medição, bem como os valores das medições realizadas nas peças fabricadas nos experimentos I e III são mostrados nas tabelas 30, 31, 32 e 33 do Anexo B.

As peças fundidas serão classificadas de acordo com esta norma em fundidos de grade A, B, C e D conforme o grau de precisão atingido pela peça fundida (baseado na média dos valores medidos). Serão consideradas aceitáveis as peças fundidas que obtiverem classificação de grade B ou melhor.

Entretanto, vale ressaltar que, de maneira geral, em cada novo desenvolvimento de uma peça microfundida o cliente comprador é quem especifica detalhadamente todos os requisitos técnico-qualitativos da peça em questão. Normalmente no desenho ou pedido de compra são especificados detalhes quanto a:

- a) Tolerâncias dimensionais e geométricas
- b) Acabamento superficial
- c) Sanidade metalúrgica
- d) Propriedades mecânicas e metalográficas
- e) Análise química, etc.

Contudo, conforme mencionado anteriormente, os critérios estabelecidos para qualificar as peças fabricadas nos estudos de casos realizados serão baseados, principalmente, na avaliação dimensional, na caracterização superficial e na inspeção visual das peças fundidas para detecção de descontinuidades superficiais, de acordo com a norma DIN 1680 [65] e referências [1,2,4]. Testes específicos para verificar as sanidades mecânica e metalúrgica das peças fundidas, bem como análises químicas não foram executadas nesta pesquisa.

5.1.2 Critérios para Avaliação dos Resultados para a Segunda Fase de Experimentos

A avaliação dos resultados para a segunda fase experimental acerca da potencialidade de uso das tecnologias de estereolitografia e microfusão em aplicações com ferramental rápido deverá levar em consideração tanto critérios técnicos, como critérios de custos e tempo de fabricação, buscando fazer um paralelo entre a técnica de *rapid tooling* utilizada e os métodos tradicionais de fabricação de ferramentas. Para que se possa realizar esta avaliação foram definidos alguns critérios e condições, sob os quais estará baseada a presente avaliação. Estes critérios são:

1. Critérios técnicos

- Avaliação dimensional (incertezas dimensionais)
- Caracterização superficial (rugosidade e porosidade dos insertos fundidos)

2. Critérios relativos à custos e tempo de fabricação

- Avaliação do tempo de fabricação
- Avaliação dos custos de fabricação

5.1.2.1 AVALIAÇÃO POR CRITÉRIOS TÉCNICOS

A avaliação por critérios técnicos deverá levar em consideração aspectos geométricos e de qualidade superficial dos insertos fabricados por microfusão.

Para a avaliação de aspectos geométricos dos insertos, optou-se por realizar uma análise das incertezas dimensionais tanto dos padrões QuickCast™ (antes do processo de microfusão), como dos insertos fundidos (depois da etapa de polimento). Estas duas etapas de medições permitem identificar em qual etapa do processo de fabricação estão ocorrendo os erros mais significativos, permitindo, assim, que se tenha uma noção mais clara em relação às tolerâncias que se podem obter em cada etapa do processo de fabricação.

A figura 53 ilustra a forma de cálculo dos valores nominais (ou esperados) nas diversas etapas do processo de fabricação.

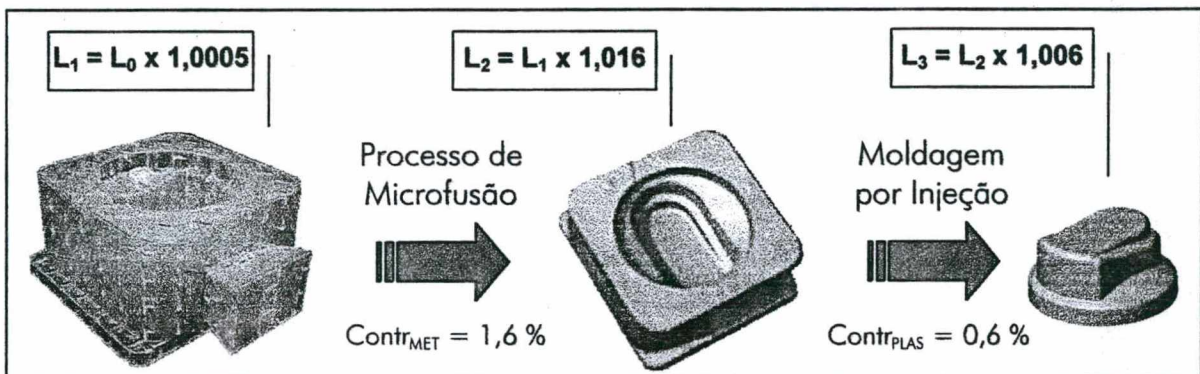


Figura 53 - Aplicação dos fatores de compensação da contração.

Partindo-se de uma dimensão (L_0) no modelo CAD da peça a ser injetada, aplicou-se o primeiro fator de compensação para a contração da resina SL5170, calculando-se então a dimensão (L_1) que o padrão QuickCast™ deve ter. Em seguida aplicou-se o fator de compensação da contração do metal durante o processo de microfusão calculando L_2 , o mesmo ocorrendo para a contração do plástico durante o processo de moldagem por injeção, obtendo finalmente L_3 .

Além da análise dimensional, outro critério importante que deve ser considerado nesta avaliação é a caracterização da qualidade superficial dos insertos fundidos, onde, a existência de porosidades resultantes do processo de fundição pode afetar a qualidade dos insertos, além de exigir um tratamento adicional para eliminar estes defeitos, consumindo tempo e aumentando os custos de fabricação.

5.1.2.2 AVALIAÇÃO POR CRITÉRIOS ECONÔMICOS E DE TEMPO

Para que um novo processo de fabricação de ferramentas venha obter sucesso e seja incorporado aos meios de produção por empresas deste setor, este, necessariamente, deve oferecer vantagens claras em termos de custos e tempo de fabricação em relação aos processos existentes e já consagrados. Sob este ponto de vista, torna-se evidente a necessidade de considerar, além dos aspectos técnicos, fatores como custos e tempo de fabricação para que uma avaliação mais efetiva e realística seja executada.

Os elementos essenciais que envolvem o cálculo dos custos de fabricação tanto para o método que utiliza a técnica de *rapid tooling* quanto para o método convencional, juntamente com os dados de tempo e custos estimados para cada etapa do processo de fabricação, são mostrados nas tabelas 22 e 23. Estes elementos servirão como base para uma análise comparativa entre os métodos convencionais e o método apresentado nesta pesquisa.

Para efeitos de comparação, a avaliação levará em consideração apenas a fabricação dos insertos tanto pela técnica *QuickCast tooling*, quanto pelos métodos tradicionais de fabricação. Os demais componentes do molde serão idênticos para ambas as técnicas. Considerou-se esta aproximação mais razoável, pois, normalmente, os componentes básicos de um molde como, por exemplo, as diversas placas existentes, cavilamentos, acessórios, furações para refrigeração, etc., são essencialmente os mesmos quer se estejam utilizando técnicas de ferramental rápido, quanto através dos métodos tradicionais.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS

5.2.1 Resultados Obtidos na Primeira Fase de Experimentos

5.2.1.1 RESULTADOS ALCANÇADOS NO EXPERIMENTO I

De maneira geral, os maiores problemas verificados durante este primeiro experimento ocorreram durante as etapas que envolviam o aquecimento do molde cerâmico contendo os padrões de resina em seu interior, especificamente, as etapas de deceramento na autoclave e de queima dos padrões no forno de calcinação. Estas etapas são sempre acompanhadas da expansão térmica dos padrões, o que gera tensões no molde cerâmico e muitas vezes leva à trincas ou mesmo quebras da casca cerâmica. Além dos

problemas de quebras internas do molde cerâmico verificou-se que as tolerâncias dimensionais obtidas para as peças na experiência I ficaram sempre acima do valor esperado, significando, provavelmente, que o valor da contração utilizada na construção dos padrões QuickCast™ era menor que o valor real.

De acordo com a classificação proposta baseada na norma DIN 1680, os resultados obtidos neste primeiro ensaio são mostrados na tabela 14 a seguir:

NOME DA PEÇA		QUALIDADE	PROBLEMAS DETECTADOS	ETAPA DO PROCESSO
Corpo de Válvula	A	GRADE C	Tipos I, III,V	Autoclave / Calcinação Construção do molde cerâmico
	B	GRADE C	Tipos I, III,V	Autoclave / Calcinação Construção do molde cerâmico
Válvula de Segurança	A	GRADE C	Tipo I, III,VIII	Autoclave / Vazamento
	B	GRADE C	Tipo III	- x -
Engrenagem	A	GRADE B	Dentro dos padrões de qualidade estabelecidos	- x -
	B	GRADE B	Dentro dos padrões de qualidade estabelecidos	- x -
Junta de Vedação	A	GRADE C	Tipo I, III,V	Autoclave / Calcinação
	B	GRADE C	Tipo III	- x -
Suporte de Eixo	A	GRADE C	Tipo I, III,IV,VII	Autoclave / Calcinação Construção do molde cerâmico
	B	GRADE C	Tipo I, III,IV,VII	Autoclave / Calcinação Construção do molde cerâmico
Calota esférica	A	GRADE C	Tipo I, III,IV	Construção do molde cerâmico
	B	GRADE C	Tipo III	- x -

Tabela 14 – Classificação das peças fundidas no experimento I

A descrição dos tipos de problemas correspondentes aos índices apresentados na tabela 14 é a seguinte:

Tipo I – Quebra ou lascamento interno do molde cerâmico, não perceptível externamente, devido à excessiva concentração de tensões.

Tipo II – Trincas visíveis externamente ou fratura completa da casca cerâmica devido à expansão térmica dos padrões e/ou fadiga térmica do molde cerâmico.

Tipo III – Fora das tolerâncias especificadas

Tipo IV – Penetração do material de pré-cobrimento no interior do padrão originando inclusões nas peças fundidas.

Tipo V – Porosidade excessiva na superfície do fundido

Tipo VI – Empenamento pronunciado da peça fundida

Tipo VII – Aparecimento de superfícies onduladas na peça fundida

Tipo VIII – Enchimento incompleto

A análise da tabela 14 mostra que a maior incidência de problemas deveu-se à quebras e lascamentos internos no molde cerâmico, resultante, provavelmente, da excessiva expansão térmica dos padrões de SL. Uma outra causa do baixo índice de rendimento de peças classificadas como aceitáveis freqüentemente encontrada, estava no controle dimensional das peças fabricadas. Observou-se em praticamente todas as peças medidas neste experimento que havia pelo menos uma dimensão para a qual a tolerância medida era maior do que a tolerância máxima admitida para classificar uma peça como aceitável (ver tabela 26 do Anexo A), significando, possivelmente, que o fator de contração usado para construir os padrões de fundição estava subdimensionado para o aço inox 304.

Além destes problemas observou-se também defeitos resultantes de inclusões de material cerâmico nas peças fundidas devido à penetração da suspensão cerâmica para o interior dos padrões *QuickCast*TM durante a etapa de recobrimento. Porosidade excessiva na superfície das peças fundidas também foi uma das causas do baixo rendimento obtido nesta primeira experiência.

Entretanto, apesar da pequena quantidade de peças fundidas neste primeiro experimento, os ensaios iniciais serviram para destacar os problemas potenciais que deverão ser enfrentados e indicar uma direção a ser seguida nos próximos ensaios visando melhorar o baixo rendimento na etapa de fundição.

Com este objetivo o segundo conjunto de experimentos foi elaborado abrangendo ensaios de expansão térmica da resina, análise termogravimétrica e medição do teor de cinzas resultantes da queima do material com que os padrões *QuickCast*TM são construídos. Este experimento visa estudar o comportamento do material quando submetido ao aquecimento em temperaturas tipicamente encontradas nos ciclos térmicos do processo de microfundição.

5.2.1.2 RESULTADOS ALCANÇADOS NO EXPERIMENTO II

➤ Decomposição Termogravimétrica da Resina SL5170

Para o teste de decomposição termogravimétrica da resina SL5170 foi utilizada uma amostra de 10,36mg de resina pós-curada em U.V, onde a temperatura foi aumentada desde $T_I = 23^\circ\text{C}$ até $T_F = 600^\circ\text{C}$. Não foi possível utilizar valores superiores à $T_F = 600^\circ\text{C}$ devido à limitações do equipamento utilizado neste experimento. As condições do ensaio e os resultados da análise termogravimétrica são mostrados na figura 54 a seguir.

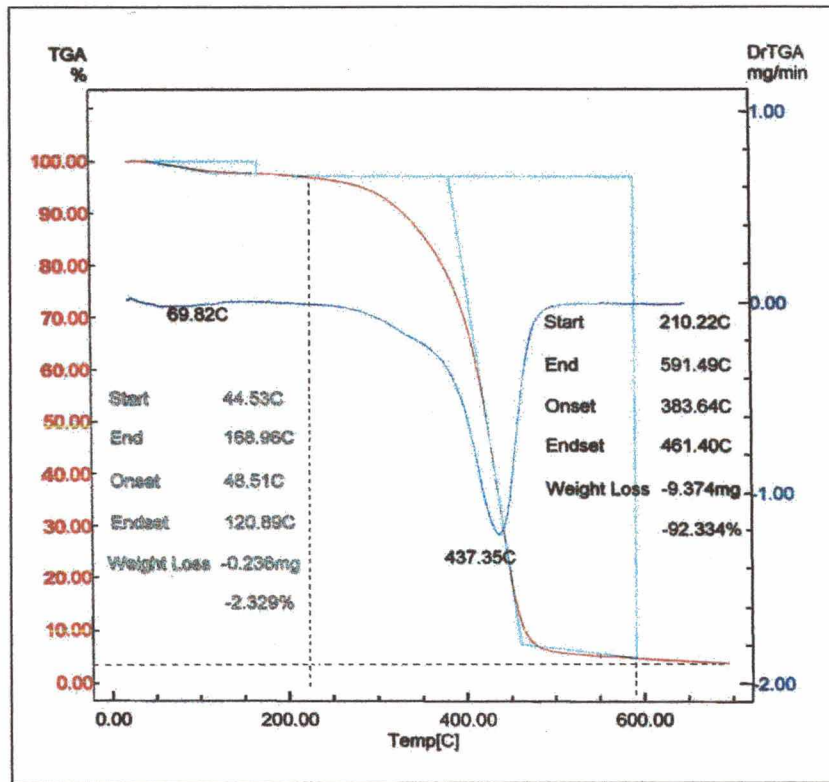


Figura 54 – Resultados da análise termogravimétrica da resina SL5170.

A análise do gráfico da figura 54 indicou o seguinte:

- A curva de decomposição térmica (linha vermelha) é dividida em dois trechos distintos. O primeiro iniciando em $44,53^\circ\text{C}$ e indo até $168,96^\circ\text{C}$ indica que, inicialmente, houve uma pequena perda de massa provavelmente causada pela evaporação de umidade e um segundo trecho iniciando em $210,22^\circ\text{C}$ e indo até $591,49^\circ\text{C}$ onde a maior parte da resina foi decomposta pela reação de combustão transformando-se, principalmente, em CO_2 e vapor d'água.
- Observando-se o gráfico do ensaio de decomposição termogravimétrica acima, nota-se que o início da reação de combustão da resina SL5170 ocorre com alguma temperatura

compreendida no intervalo entre 250°C e 350°C, pois, nesta faixa de temperaturas, o percentual de perda de massa aumentou significativamente, devido a possível reação de combustão que estava ocorrendo.

- Queimando em temperaturas próximas de 600°C, o percentual de perda de massa foi muito grande, chegando à 96,5% da massa inicial, ou seja, a quantidade de cinzas residuais produzidas foi de apenas 3,5% da massa inicial (0,36mg em 10,36mg).
- Se a temperatura fosse aumentada até valores acima de 1.000°C e se o ensaio fosse realizado em um ambiente rico em oxigênio como é o caso real dos fornos de calcinação, certamente a decomposição térmica da resina poderia ter sido um pouco maior, conseqüentemente a quantidade de cinzas seria ainda menor.
- Considerando a natureza quase oca dos padrões QuickCast™, e portanto, uma massa muito reduzida, pode-se, seguramente, negligenciar esta quantidade de cinzas na etapa de queima do processo de microfusão, se uma quantidade suficiente de oxigênio for fornecida para a combustão.

➤ **Expansão Térmica da Resina SL5170**

O objetivo principal deste ensaio foi verificar o comportamento de expansão térmica da resina para temperaturas tipicamente encontradas em um ciclo de deceramento em autoclave (25°C à 120°C), pois esta etapa mostrou-se a mais problemática no processo de microfusão.

Para este experimento foi utilizado o estilo de construção sólido (ACES) ao invés do QUICKCAST para evitar as interferências dos vazios existentes neste último. A geometria dos corpos de prova tinha a forma cilíndrica com 8 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. Foram ensaiadas quatro amostras da resina SL5170 sendo que os resultados mantiveram-se praticamente constantes de uma amostra para outra. A figura 55 mostra os resultados de uma típica análise dilatométrica realizada com a resina SL5170.

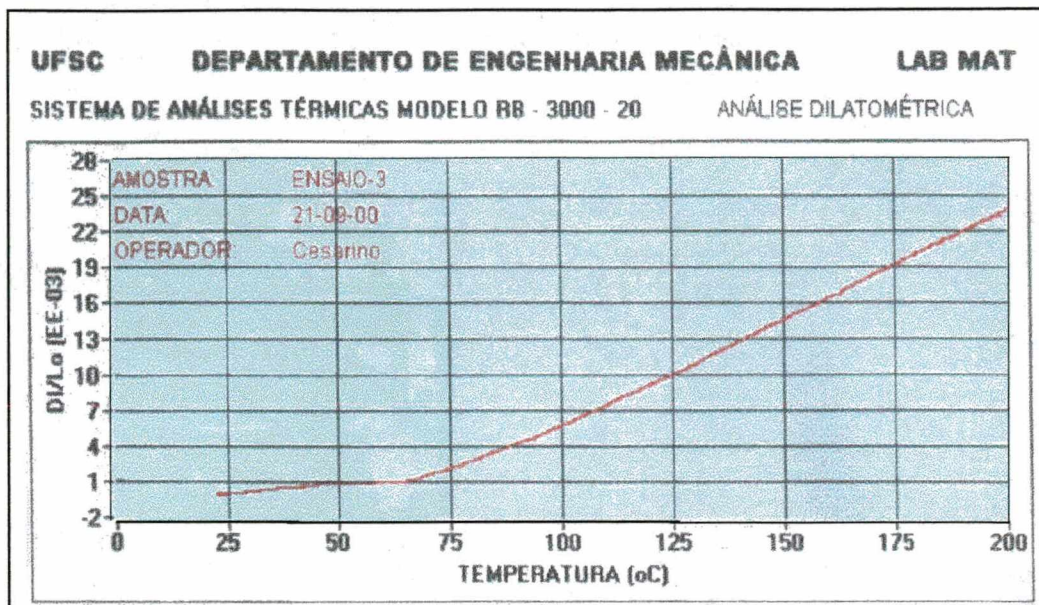


Figura 55 – Resultados da análise dilatométrica da resina SL5170.

Os resultados destes testes demonstram as “ALTAS” taxas de expansão térmica da resina SL5170, indicando um aumento contínuo da expansão com o aumento da temperatura para o intervalo ensaiado. Em um ciclo de autoclave, a temperatura atingida pelo vapor d’água situa-se em torno de 100°C à 120°C, correspondendo à uma expansão térmica de 0,5 à 1,0% do comprimento inicial. Conseqüentemente, quando calor é aplicado para remover a cera das árvores no interior da autoclave, os padrões QuickCast™ se expandirão mais do que a casca cerâmica que possui um CTE menor. Esta expansão térmica exercerá considerável tensão sobre a casca cerâmica ainda sem muita resistência, podendo levar à trincas e mesmo quebras no molde cerâmico.

Devido à toxicidade das resinas epóxi e à deficiência de exaustão de gases do local onde está localizado o dilatômetro, decidiu-se não ensaiar as amostras em temperaturas superiores à de ignição para evitar a sua combustão. Entretanto, se o ensaio fosse conduzido até temperaturas mais altas poderia-se identificar uma faixa de temperaturas em que a expansão térmica começasse a declinar. Esta faixa de temperaturas deve situar-se próxima da temperatura de combustão da resina que, de acordo com os dados da análise termogravimétrica realizada, situa-se em algum ponto entre 250°C e 350°C. Durante a combustão, a massa da amostra vai sendo consumida até atingir um ponto em que a perda de massa iguala-se à expansão térmica. A partir deste ponto a perda de massa será sempre superior à expansão térmica que começará a diminuir. Portanto, a máxima taxa de expansão térmica da resina deverá situar-se entre 200°C e 350°C.

➤ Determinação do teor de Cinzas

Adicionalmente ao ensaio de decomposição termogravimétrica, realizado em condições de laboratório, foi executado um teste específico para medição da quantidade de cinzas residuais em condições reais, utilizando o próprio forno de calcinação existente na empresa onde os demais ensaios foram realizados. Para este ensaio foram utilizados quatro padrões *QuickCast™* em forma de cilindros com 20mm de diâmetro e 50mm de comprimento. As condições de queima no forno de calcinação foram as seguintes:

- Temperatura interna do forno de calcinação: 1560°C
- Tempo de permanência no interior do forno de calcinação: 90 minutos
- Condições ambientes no interior do forno de calcinação com excesso de oxigênio (insuflamento de ar)

Os resultados obtidos neste experimento foram os seguintes:

Tabela 15 – Medição do teor de cinzas resultante da queima da resina SL5170.

Identificação	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Teor de Cinzas (%)
Corpo de Prova A	9,457	0,122	1,3%
Corpo de Prova B	9,126	0,195	2,2%
Corpo de Prova C	9,379	0,284	3,0%
Corpo de Prova C	9,258	0,157	1,7%
Teor Médio de Cinzas Residuais			2,1%

Como pode-se observar nos resultados dos testes mostrados na tabela 15, as resinas epóxi propiciam uma queima com uma quantidade muito pequena de cinzas em um ambiente rico em oxigênio e queimando em temperaturas acima de 1.000°C. Isto é importante pois a cinza retida dentro da casca cerâmica pode levar a inclusões, sendo uma das causas mais frequentes da baixa qualidade e de rejeição de protótipos fundidos. Em temperaturas acima de 400°C na presença de oxigênio suficiente, a maior parte do carbono proveniente do hidrocarboneto é quimicamente convertido em dióxido de carbono (CO₂) e o hidrogênio é convertido em vapor d'água [40]. O restante do material que não sofreu combustão é convertido em cinzas.

5.2.1.3 RESULTADOS ALCANÇADOS NO EXPERIMENTO III

A partir da análise dos resultados dos experimentos anteriores, elaborou-se esta terceira fase de experiências visando estudar a influência de alguns parâmetros de construção dos padrões QuickCast™. Os resultados obtidos nesta etapa, segundo a classificação proposta, são apresentados na tabela 16:

Tabela 16 – Classificação das peças fundidas no experimento III.

Parâmetro de construção estudado		Padrão Qualidade	Problemas Detectados	Etapa do Processo
Espessura de Parede	0.30 mm	GRADE B	Tipos I, IV, VII	Autoclave / Calcinação Construção do molde cerâm.
		GRADE B	- x -	
	0.45 mm	GRADE B	- x -	Autoclave / Calcinação
		GRADE C	Tipo I	
	0.60 mm	GRADE B	Tipos I e V	Autoclave / Calcinação Vazamento metal
		N/D	Tipo II	
Tipo de Estrutura Interna	Triangular	GRADE C	Tipos I e VIII	Autoclave / Calcinação Umidade
		N/D	Tipo II	
	Quadrada	GRADE B	- x -	Autoclave / Calcinação
		GRADE C	Tipo I, III	
	Hexagonal	GRADE B	- x -	- x -
		GRADE C		
Espaçamento da Estrutura Interna	1.5 mm	N/D	Tipo II, IV	Autoclave / Calcinação
		N/D	Tipo II	
	3.125 mm	GRADE B	- x -	Preparação dos padrões QC Construção do molde cerâmico
		GRADE B	Tipo IV	
	6.0 mm	GRADE C	Tipo VII	Absorção de umidade
		GRADE B		

O índice N/D para o padrão de qualidade mostrado na tabela 16 significa “Não Disponível”, pois as cascas cerâmicas sofreram fratura completa nas cavidades correspondentes à estas peças (ver figura 66, no capítulo VI), conseqüentemente, não foram fundidas.

Novamente nesta terceira fase de experimentos os principais problemas detectados estavam relacionados com pequenas quebras e lascamentos no interior do molde cerâmico e em alguns casos chegando à fratura completa do molde em alguns locais. Em relação às tolerâncias dimensionais das peças fundidas, após a correção do fator de contração, apenas

uma dimensão em duas das peças diferentes tiveram seus valores fora da tolerância especificada pela norma. Houve também uma redução da ocorrência de vazios devido à inclusões de material cerâmico no interior dos padrões QuickCast™ possivelmente como resposta à mudança no material usado para cobrir os furos correspondentes aos drenos e respiros.

Um outro problema não observado anteriormente foi o aparecimento de superfícies onduladas nas peças fundidas, especialmente em padrões cuja estrutura interna foi largamente espaçada. A Porosidade superficial manteve-se como um problema a ser resolvido em futuras experiências, entretanto, este problema está mais relacionado com o próprio processo de microfusão e com o sistema de alimentação de metal líquido do que propriamente com o uso de padrões QuickCast™.

5.2.2 Resultados Obtidos na Segunda Fase de Experimentos

5.2.2.1 RESULTADOS ALCANÇADOS NO ESTUDO DE CASO I

Neste primeiro estudo de casos em ferramental rápido buscou-se testar uma alteração no processo tradicional de microfusão através da eliminação da etapa de deceramento em autoclave. Os resultados obtidos com esta alteração foram contrastantes em termos da qualidade das peças fundidas, como se pode observar nas fotografias mostradas nas figuras 56 e 57 e a partir dos dados qualitativos apresentados na tabela 17, onde são identificados os tipos de problemas ocorridos neste experimento.

Tabela 17 – Classificação das peças fundidas no estudo de casos I em ferramental rápido.

Identificação do Inserto		Padrão Qualidade	Problemas Detectados	Etapa do Processo
Processo Tradicional de Microfusão	Tampa Fêmea	GRADE B	Tipo V	Construção do molde cerâmico
	Tampa Macho	GRADE B	Tipos I, VII	Autoclave / Calcinação
	Botão Fêmea	N/D	Tipos II	Autoclave / Calcinação
	Botão Macho	GRADE B	Tipos I, IV	Autoclave / Calcinação
Eliminação da Etapa de deceramento	Tampa Fêmea	GRADE B	Tipos V, VII	Formação da casca / Microfusão
	Tampa Macho	GRADE B	Tipo VII	Microfusão
	Botão Fêmea	GRADE B	Tipos V, VII	Microfusão
	Botão Macho	GRADE B	Tipo V	Formação da casca / Microfusão

Observando os dados correspondentes aos tipos de problemas ocorridos mostrados na tabela 17 é possível notar, novamente, que no processo normal de microfusão (incluindo a etapa de deceramento) problemas relativos à expansão térmica dos padrões causaram novamente a quebra da casca cerâmica na cavidade correspondente ao inserto fêmea da peça botão regulador de temperatura. Além deste, observou-se também problemas relacionados à porosidade excessiva em zonas moldantes nos insertos fêmea (cavidades) tanto na peça tampa como no do botão. Ondulações nas paredes laterais foram detectadas em todos os insertos fundidos. As causas destes problemas e sua correlação com os parâmetros de construção e com os fenômenos que ocorrem durante o processo de microfusão serão discutidos no próximo capítulo.

A figura 56 mostra uma fotografia do conjunto de insertos obtidos pelo processo de microfusão com a eliminação da etapa de deceramento na autoclave, antes de serem enviados para a etapa de acabamento superficial.

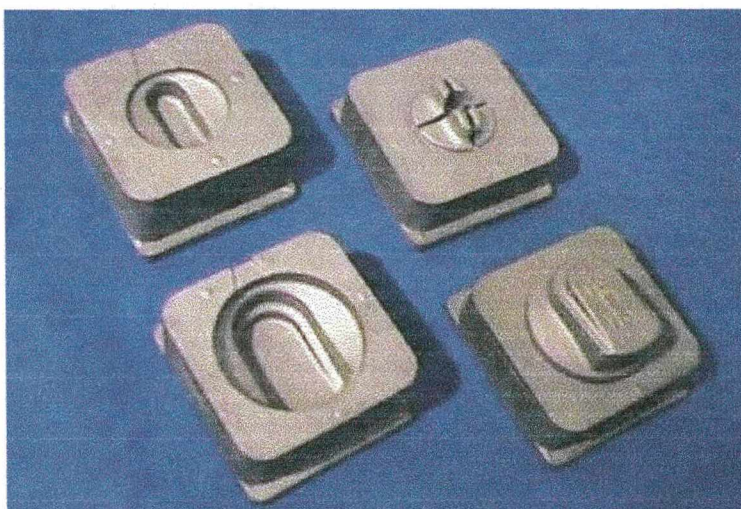


Figura 56 - Fotografia dos insertos fundidos no estudo de casos I obtidos pela eliminação da etapa de deceramento.

Na figura 57 são mostrados os insertos fabricados utilizando o processo tradicional de microfusão (incluindo a etapa de deceramento), onde observa-se a falta do inserto fêmea do botão regulador de temperatura devido à quebra da casca cerâmica na cavidade correspondente à este inserto.

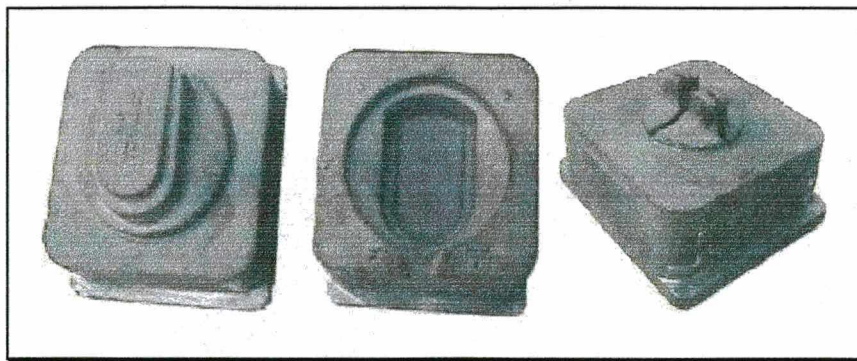


Figura 57 - Fotografia dos insertos fundidos no estudo de casos I pelo processo tradicional de microfusão.

As figuras 58 e 59 mostram os insertos fundidos após a operação de acabamento superficial e as peças injetadas nestes insertos, respectivamente.



Figura 58 – Insertos QuickCast após acabamento superficial



Figura 59 – Peças injetadas nos insertos QuickCast tooling

A seguir são apresentados os resultados dos experimentos para o segundo estudo de casos relativo à avaliação de acordo com critérios técnicos, econômicos e de tempo de fabricação para a técnica de *rapid tooling* proposta.

5.2.2.2 RESULTADOS ALCANÇADOS NO ESTUDO DE CASO II

No segundo estudo de casos em ferramental rápido foram estudados aspectos relacionados com a avaliação do uso das tecnologias de estereolitografia e microfusão na fabricação de insertos para moldes de injeção de plásticos. Para isso foram estabelecidos critérios relacionados com aspectos técnicos, de custos e de tempo de fabricação. Os resultados obtidos são apresentados a seguir:

➤ Avaliação sob Critérios Técnicos

Para a execução da análise dimensional, medições foram realizadas (i) nos padrões QuickCast™ dos insertos, (ii) nos insertos fundidos após a etapa de acabamento superficial e (iii) nas peças plásticas injetadas nos insertos *QuickCast*, com o objetivo de identificar quais etapas são as mais críticas em relação à incerteza dimensional.

A tabela 18 apresenta os resultados das medições para três dimensões (D_1 , D_2 , D_3) realizadas nos insertos “tampa macho” e “tampa fêmea”, onde são mostrados alguns dados estatísticos sobre a caracterização dimensional destes insertos. A figura 62 ilustra os erros ou o desvio das medições em relação ao valor nominal esperado, calculado a partir dos dados da tabela 18. A tabela 19 e a figura 63 ilustram estes mesmos dados, porém para os insertos correspondentes à peça botão regulador de temperaturas.

Os pontos de medição das dimensões D_1 , D_2 e D_3 para os insertos macho e fêmea das duas peças são mostrados na figura 60:

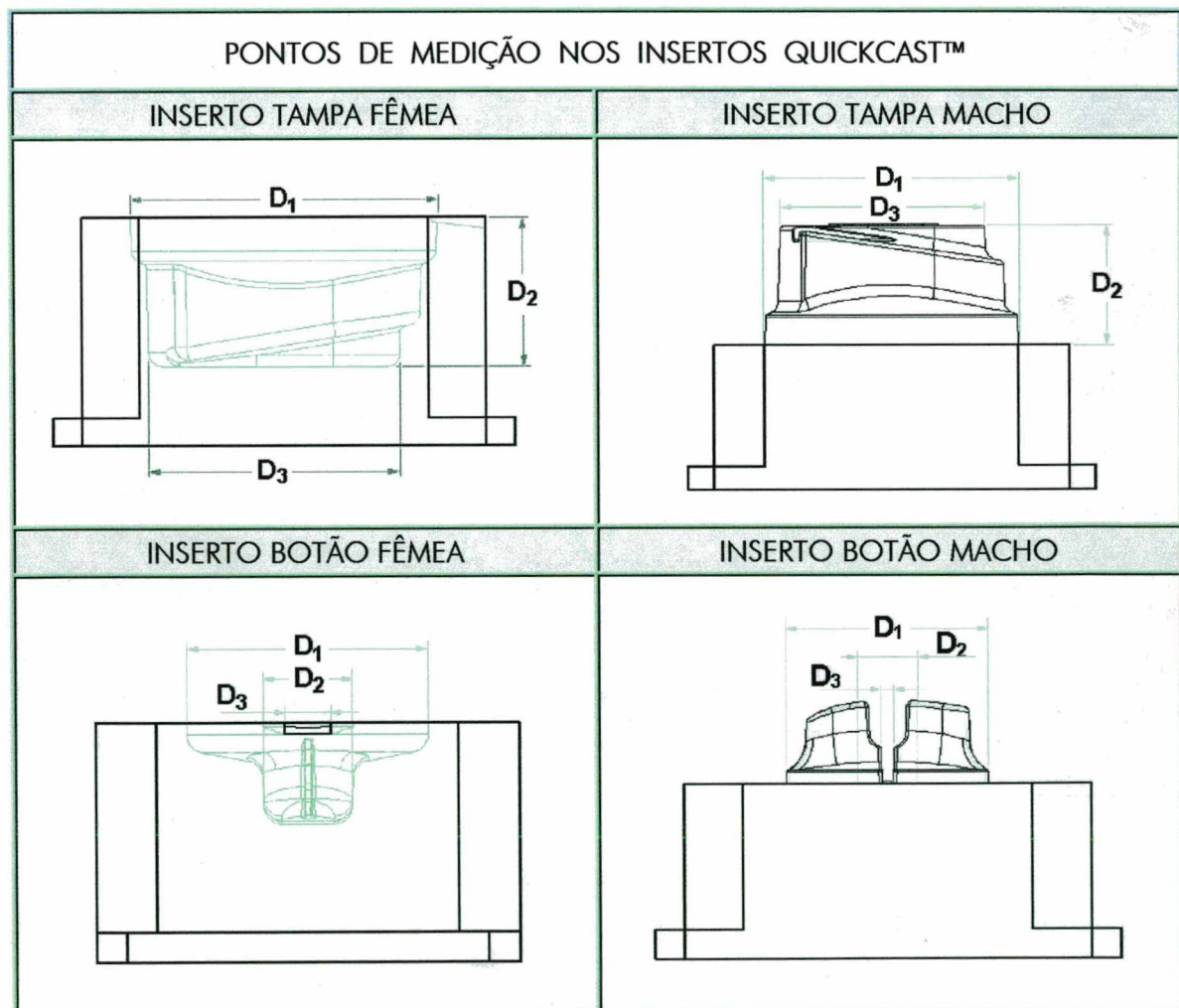


Figura 60 - Pontos de medição nos insertos QuickCast™

Na figura 61 são mostrados os pontos de medição para as peças injetadas durante as experiências realizadas nos estudos de casos em ferramental rápido.

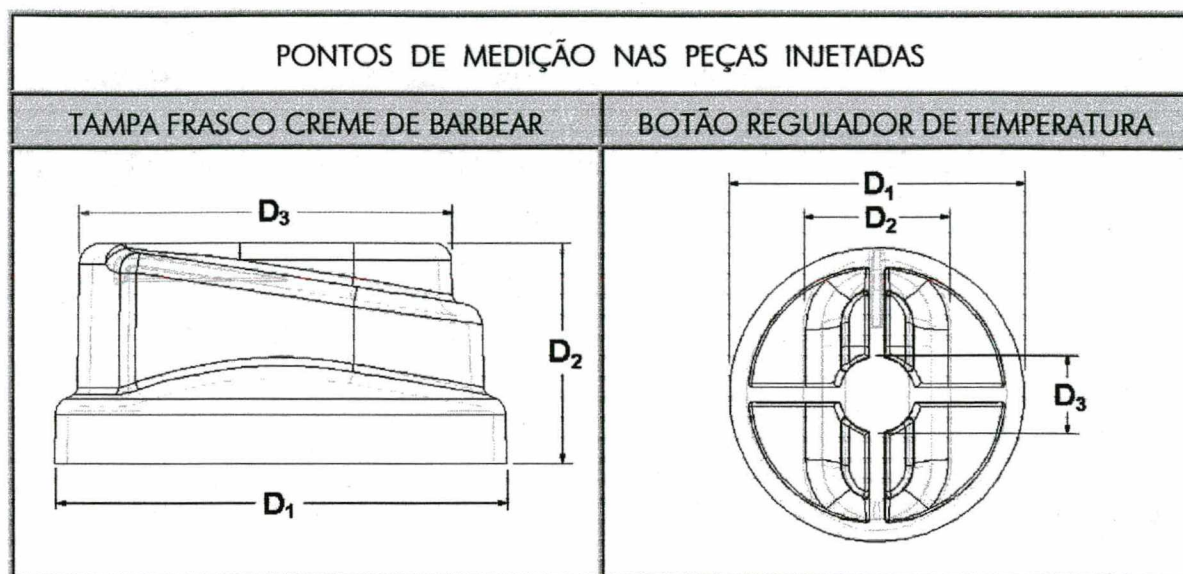


Figura 61 – Pontos de medição nas peças injetadas.

Os valores correspondentes à “média” foram obtidos a partir de cinco medições para cada dimensão (D_1 , D_2 e D_3) realizadas após a etapa de acabamento superficial. As medições foram feitas (i) nos padrões *QuickCast™*, (ii) nos insertos fundidos e (iii) nas peças injetadas, conforme mostrado na tabela 18 a seguir.

Análise Estatística	Insero Tampa – Fêmea									Insero Tampa – Macho								
	Padrão QC			Insero Fund.			Peça Injetada			Padrão QC			Insero Fund.			Peça Injetada		
	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3
Valor Nominal	54,17	26,57	44,56	53,32	26,16	43,86	53,00	26,00	43,60	51,10	25,04	41,50	50,30	24,65	40,84	50,00	24,50	40,60
Média	54,24	26,71	44,73	53,66	26,24	44,06	53,12	26,07	43,74	51,38	25,24	41,66	50,42	24,82	41,15	49,82	24,55	40,76
Desvio Padrão	0,09	0,13	0,09	0,15	0,08	0,10	0,12	0,05	0,08	0,12	0,08	0,13	0,12	0,08	0,10	0,08	0,06	0,12
Intervalo de Confiança	$\pm 0,08$	$\pm 0,11$	$\pm 0,08$	$\pm 0,13$	$\pm 0,07$	$\pm 0,09$	$\pm 0,10$	$\pm 0,04$	$\pm 0,07$	$\pm 0,10$	$\pm 0,07$	$\pm 0,11$	$\pm 0,10$	$\pm 0,07$	$\pm 0,09$	$\pm 0,07$	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$
Mínimo	54,14	26,60	44,65	53,40	26,12	43,92	53,06	25,98	43,66	51,18	25,15	41,58	50,28	24,65	40,94	49,60	24,46	40,52
Máximo	54,36	26,92	44,82	53,74	26,34	44,20	53,24	26,14	43,84	51,46	25,33	51,70	50,62	25,06	41,32	49,98	24,64	40,88

Tabela 18 – Análise dimensional para a tampa de frasco espuma de barbear.

As figuras 62 e 63 ilustram graficamente os dados de incerteza dimensional dos insertos fundidos em relação ao valor nominal calculado através da aplicação dos fatores de contração.

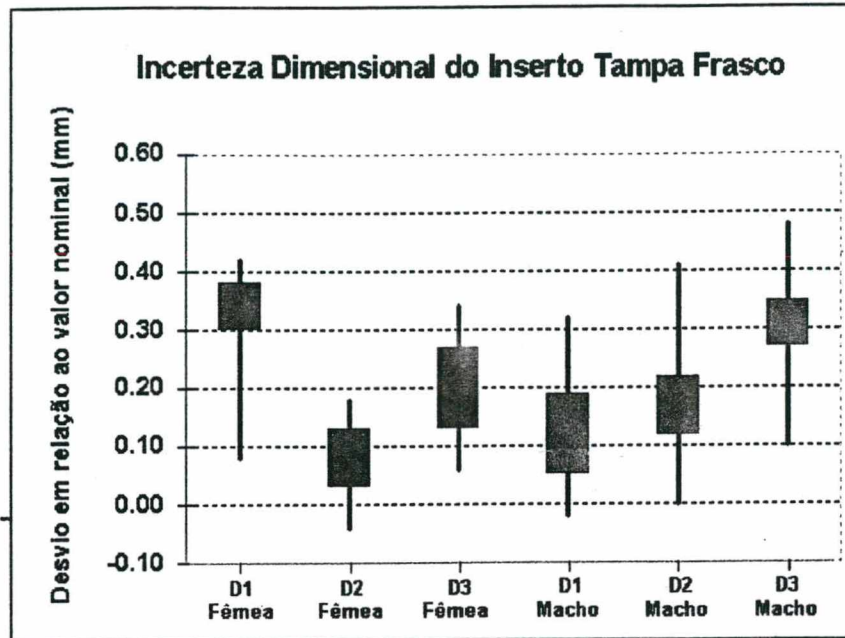


Figura 62 - Incerteza dimensional do inseto tampa de frasco espuma de barbear.

Análise Estatística	Inseto Botão - Fêmea									Inseto Botão - Macho								
	Padrão QC			Inseto Fund.			Peça Injetada			Padrão QC			Inseto Fund.			Peça Injetada		
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₁	D ₂	D ₃
Valor Nominal	40,88	15,02	7,56	40,24	14,80	7,44	40,00	14,70	7,40	35,77	10,53	2,04	35,21	10,36	2,01	35,00	10,30	2,00
Média	40,97	15,18	7,60	40,55	15,04	7,46	40,25	14,96	7,42	35,82	10,63	2,06	35,42	10,38	2,02	35,10	10,35	2,06
Desvio Padrão	0,08	0,06	0,04	0,07	0,05	0,03	0,08	0,06	0,03	0,06	0,07	0,03	0,08	0,04	0,02	0,06	0,04	0,02
Intervalo de Confiança	± 0,07	± 0,05	± 0,03	± 0,06	± 0,04	± 0,02	± 0,07	± 0,05	± 0,02	± 0,05	± 0,06	± 0,02	± 0,07	± 0,03	± 0,01	± 0,05	± 0,03	± 0,01
Mínimo	40,88	14,98	7,56	40,44	14,90	7,38	40,08	14,70	7,36	35,62	10,52	2,04	35,14	10,26	2,00	35,00	10,28	2,02
Máximo	41,04	15,26	7,68	40,68	15,12	7,52	40,35	15,12	7,54	36,00	10,83	2,10	35,58	10,50	2,04	35,15	10,40	2,08

Tabela 19 - Análise dimensional para o botão regulador de temperatura.

Na figura 63 são mostrados os dados de incerteza dimensional resultantes das medições realizadas nos insertos macho e fêmea do botão regulador de temperatura após o etapa de acabamento superficial.

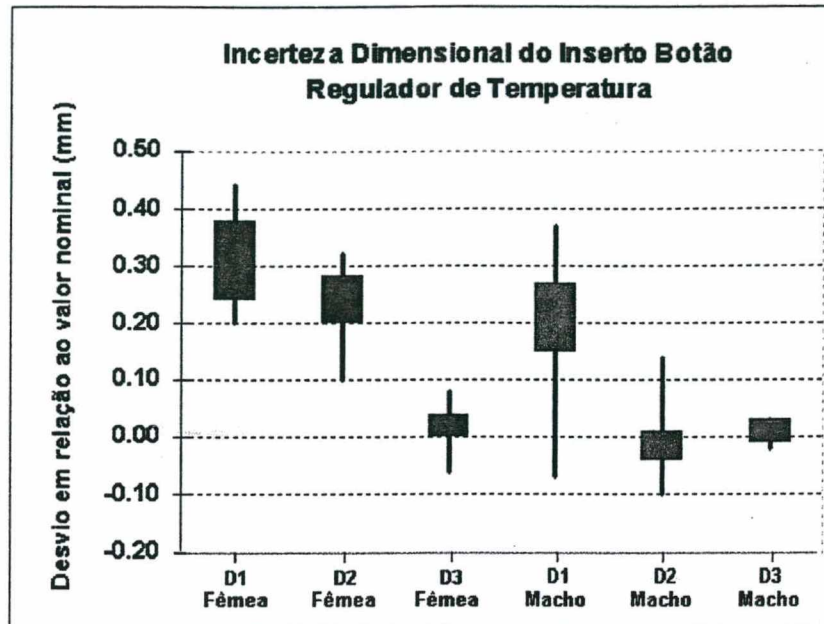


Figura 63 - Incerteza dimensional do inseto botão regulador de temperatura.

Outro aspecto avaliado relacionado à critérios técnicos foi a rugosidade superficial resultante nos insertos fundidos. Para a caracterização da rugosidade superficial foi utilizado um rugosímetro Perthen™ (LMP/UFSC). As medições foram executadas em três direções diferentes, tanto em paredes verticais (planos XZ, YZ), como horizontais (plano XY) e também em superfícies curvas na zona moldante dos insertos fundidos antes da operação de acabamento superficial. Os resultados das medições não variaram significativamente de uma geometria de inseto para outra, nem tampouco entre as diferentes direções medidas. A tabela 20 apresenta os resultados das medições do perfil de rugosidades em uma superfície típica.

Parâmetros de Medição da Rugosidade	\bar{X}	σ	R	MAX	MIN
R_A (μm)	4.7	0.4	0.6	5.2	4.3
R_Z (μm)	35.7	3.4	1.8	37.3	30.1
R_{PM} (μm)	15.6	2.8	2.2	16.9	13.2
R_T (μm)	47.2	8.7	10.3	53.7	42.3
R_{MAX} (μm)	45.4	6.0	8.4	49.8	38.8

Tabela 20 – Caracterização da rugosidade superficial dos insertos fundidos.

Em relação à qualidade superficial dos insertos fundidos, estes apresentaram uma superfície com um nível de porosidade variável. Alguns insertos apresentaram uma grande quantidade de poros, enquanto em outros, estes praticamente inexistiram ou foram facilmente removidos da superfície durante a etapa de polimento. A análise em microscópio revelou, também, que o tamanho e a profundidade dos poros existentes foi variável, seguindo, aparentemente, uma distribuição normal. Os maiores poros apresentaram diâmetros da ordem de 1.5 mm.

Os insertos onde a porosidade não foi totalmente removida durante a etapa de polimento tiveram que ser processados para o fechamento dos poros utilizando um composto de epóxi.

Um parâmetro adicional medido foi a dureza superficial dos insertos fundidos. Para isso foi utilizado um durômetro OMAG. Os resultados das medições são apresentados a seguir:

DUREZA SUPERFICIAL [RC]	INSERTO TAMPA FÊMEA	INSERTO TAMPA MACHO	INSERTO BOTÃO FÊMEA	INSERTO BOTÃO MACHO
Medição 1	14	14.5	16	15
Medição 2	15	15	15	15
Medição 3	14	15	15.5	14.5
Média (X)	14.3	14.8	15.5	14.8

Tabela 21 – Caracterização da dureza superficial dos insertos fundidos.

Observando os dados da tabela acima, podemos notar que os valores de dureza dos insertos fundidos situaram-se entre 14 e 16 RC. Dependendo da quantidade de peças a serem injetadas (em milhares de ciclos) os insertos poderão sofrer tratamentos térmicos e químicos para atingir uma dureza final típica de cavidades de cerca de 46 à 52 RC.

➤ Avaliação sob Critérios Econômicos e de Tempo

Um outro critério utilizado nesta pesquisa para avaliar o potencial da técnica *QuickCast tooling* envolveu a determinação dos custos e do tempo de fabricação deste tipo de ferramental e sua comparação com os métodos tradicionais de fabricação de ferramentas. As tabelas 22 e 23 mostram os custos associados às diversas etapas do processo de fabricação para a técnica *QuickCast tooling* e para os métodos convencionais, respectivamente.

TAREFA	TEMPO (H)	CUSTO DIRETO		CUSTO DE MATERIAL	
MODELAMENTO CAD 3D	t_{MOD}	$C_{MOD} = t_{MOD} \cdot (C_{SOFT} + C_{ENG})$	R\$ = 640,00	-	-
PREPARAÇÃO (Orient., Fatiam. e Programa NC)	t_{PREP}	$C_{PREP} = t_{PREP} \cdot (C_{EQ} + C_{ENG})$	R\$ = 60,00	-	-
CONSTRUÇÃO SLA 250/30A	t_{CONS}	$C_{CONS} = t_{CONS} \cdot (C_{EQ} + C_{ENG})$	R\$ = 1.300,00	$C_{MAT} = \text{Peso}_{PEÇA} \cdot C_{MAT}$	R\$ = 80,00
PÓS PROCESSAMENTO	t_{PP}	$C_{PP} = t_{PP} \cdot (C_{EQ} + C_{OPERADOR})$	R\$ = 100,00	$C_{MAT} = \text{Material de limpeza e acabamento}$	R\$ = 20,00
MICROFUSÃO	t_{FUND}	$C_{FUND} = C_{FAB,MOL} + C_{ENERG}$	R\$ = 250,00	$C_{MAT} = C_{CERÂMICA} + C_{ACO}$	R\$ = 300,00
POLIMENTO DOS INSERTOS FUNDIDOS	t_{POL}	$C_{POL} = t_{POL} \cdot C_{OPERADOR}$	R\$ = 350,00	$C_{MAT} = C_{LIXAS} + C_{MAT.POL}$	R\$ = 100,00
TOTAL*	t_{TOTAL}	$C_{TOTAL} = C_{MOD} + C_{PREP} + C_{CONS} + C_{PP} + C_{FUND} + C_{POL}$	R\$ = 2.700,00	$C_{MATERIAIS}$	R\$ = 500,00

Tabela 22 - Elementos para análise de tempos e custos de fabricação de insertos através da técnica QuickCast™ Tooling

TAREFA	TEMPO (H)	CUSTO DIRETO		CUSTO DE MATERIAL	
MODELAMENTO CAD 3D	t_{MOD}	$C_{MOD} = t_{MOD} \cdot (C_{SOFT} + C_{ENG})$	R\$ = 640,00	-	-
PREPARAÇÃO (Geração Trajet., Programa NC)	$t_{GER,NC}$	$C_{GER,NC} = t_{GER,NC} \cdot (C_{SOFT} + C_{ENG})$	R\$ = 400,00	-	-
USINAGEM DOS INSERTOS	t_{FRES}	$C_{FRES} = t_{FRES} \cdot (C_{EQ} + C_{ENG})$	R\$ = 1.600,00	$C_{MAT} = C_{FERR} + C_{ACO}$	R\$ = 370,00
POLIMENTO DOS INSERTOS	t_{POL}	$C_{POL} = t_{POL} \cdot C_{OPERADOR}$	R\$ = 350,00	$C_{MAT} = C_{LIXAS} + C_{MAT.POL}$	R\$ = 100,00
TOTAL	t_{TOTAL}	$C_{TOTAL} = C_{MOD} + C_{PREP} + C_{CONS} + C_{PP} + C_{FUND} + C_{POL}$	R\$ = 2.990,00	$C_{MATERIAIS}$	R\$ = 470,00

Tabela 23 - Elementos para análise de tempos e custos de fabricação de insertos através de métodos convencionais.

A estimativa do tempo de usinagem usada nos cálculos dos custos de fabricação para o estudo de caso no método tradicional foi realizado através da simulação do tempo de usinagem no software de CAM (PowerMill™) usado para geração das trajetórias de usinagem e do programa NC. Sendo os dados de custos/hora de modelamento, usinagem e acabamento superficial coletados junto à empresas fabricantes de moldes.

A figura 64 mostra o tempo gasto em cada uma das etapas do processo de fabricação do ferramental QuickCast™.

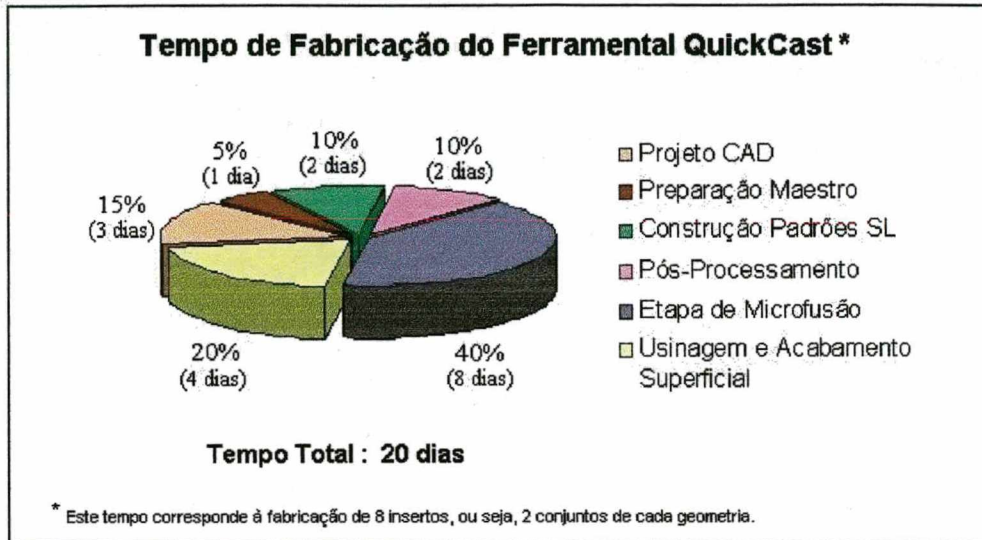


Figura 64 – Diagrama de tempo de fabricação do ferramental QuickCast™

Na figura 65 são mostrados os custos de fabricação aproximados em cada etapa do processo de fabricação do ferramental QuickCast.



Figura 65 – Diagrama de custos de fabricação do ferramental QuickCast™

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS: FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS METÁLICOS FUNCIONAIS

6.1.1 Principais Problemas Encontrados Durante os Experimentos

6.1.1.1 TRINCAS OU QUEBRAS DO MOLDE CERÂMICO

Durante os testes realizados nos experimentos I e III, observou-se que os maiores problemas encontrados estavam relacionados à ocorrência de trincas e quebras no molde cerâmico durante as etapas que envolviam o aquecimento do molde contendo os padrões de resina em seu interior, especialmente durante a etapa de deceramento na autoclave. Esta etapa é sempre acompanhada da expansão térmica dos padrões, o que gera tensões no molde cerâmico que muitas vezes leva à trincas ou mesmo quebras da casca cerâmica. A figura 66 ilustra quebras do molde cerâmico ocorridas durante a etapa de deceramento no experimento III.

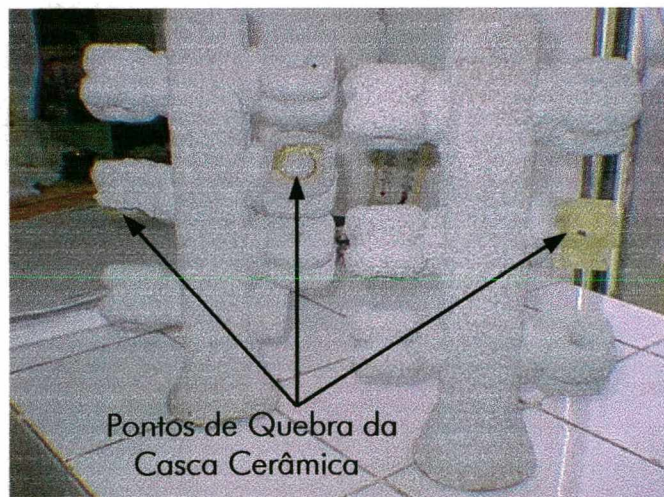


Figura 66 – Quebras da casca cerâmica devido à expansão térmica dos padrões

Inúmeros são os fatores e as variáveis que influenciam o comportamento dos padrões QuickCast™ no interior dos moldes cerâmicos durante os ciclos térmicos à que estão sujeitos no processo de microfusão. Esta complexa interação entre o padrão QuickCast™ e a casca cerâmica é, muitas vezes, difícil de ser compreendida por não se conhecer completamente todos os fatores existentes e também a forma com que estes fatores interagem entre si e no processo como um todo. Alguns destes fatores foram estudados visando compreender melhor os fenômenos que ocorrem durante estas etapas do processo de microfusão e são apresentados mais adiante neste capítulo.

6.1.1.2 DRENAGEM INCOMPLETA DOS PADRÕES

Este problema foi especialmente mais pronunciado nos padrões cujas estruturas internas eram muito pequenas ou em seções dos padrões que possuíam paredes muito finas, onde uma simples drenagem por gravidade não era suficiente para superar o retardo de fluxo devido aos efeitos de capilaridade e das forças viscosas. Outra provável causa da drenagem incompleta, principalmente no experimento I, foi o subdimensionamento do sistema de drenos e respiros que possuíam diâmetros muito pequenos e em quantidade insuficiente para garantir uma boa drenagem.

6.1.1.3 POROSIDADE NA SUPERFÍCIE DO FUNDIDO

Em praticamente todas as peças fundidas dos experimentos I e III verificou-se a existência de porosidade na superfície da peça fundida. A porosidade pode ser produzida na superfície de uma peça por diversos motivos, constituindo uma das discontinuidades mais comuns. Uma análise em microscópio revelou que os poros resultantes apresentavam, em geral, uma forma aproximadamente esférica possuindo dimensões que variavam desde frações de milímetro até 1.5 mm nos maiores. Entre as causas mais comuns do aparecimento de porosidade superficial têm-se: (a) aprisionamento de gases na superfície da peça fundida, (b) partículas sólidas de material refratário existentes no material de pré-cobrimento com dimensões substancialmente maiores do que a granulometria média, (c) bolhas de ar não detectadas durante recobrimento dos padrões com a primeira camada de material cerâmico, (d) ressecamento da camada cerâmica que fica em contato com os padrões permitindo a permeabilidade do metal fundido, entre outras.

6.1.1.4 INCLUSÕES DE MATERIAL CERÂMICO NAS PEÇAS FUNDIDAS

Algumas peças fundidas, principalmente no experimento I, apresentaram inclusões de material cerâmico como resultado da penetração do material de pré-cobrimento através

de algum furo não coberto ou não detectado no padrão. Estes pequenos furos podem ser provenientes de algum dreno ou respiro negligenciado durante o seu fechamento ou podem ser resultantes da remoção dos suportes na face inferior dos padrões.

A figura 67 ilustra o detalhe de uma casca cerâmica que sofreu fratura completa, mostrando as inclusões do material de pré-cobrimento no interior do padrão QuickCast™.

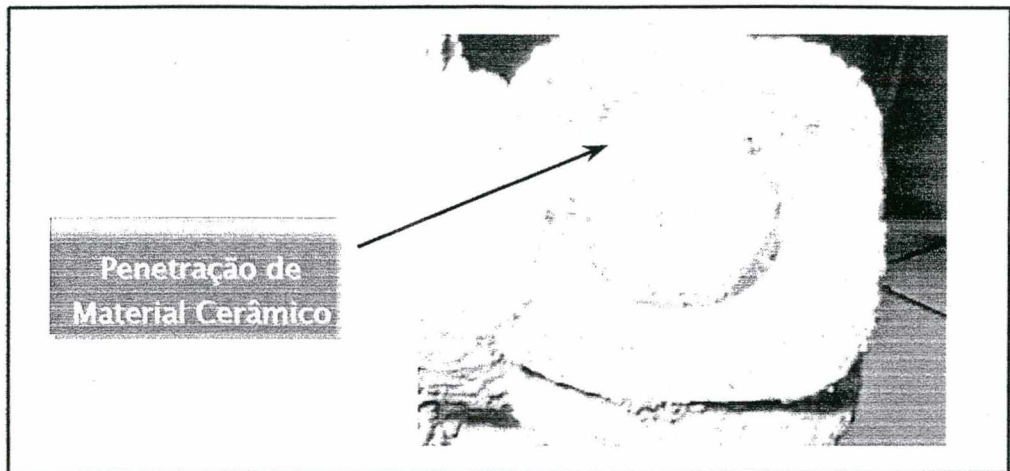


Figura 67 - Penetração do material cerâmico no interior do padrão QuickCast™

Uma outra hipótese para a causa do aparecimento destas inclusões nas peças fundidas durante o experimento I pode ter sido devido ao fato de que a cera de fundição utilizada para selar os furos ter-se descolado durante a etapa de pré-cobrimento permitindo que a suspensão cerâmica penetrasse nos padrões causando este tipo de defeito. De qualquer uma das formas, se algum furo não for detectado e devidamente preenchido a suspensão cerâmica poderá invadir o interior do padrão resultando em uma peça de qualidade inferior.

Para buscar solucionar este problema, nos testes do experimento III utilizou-se uma cola adesiva a base de epóxi no lugar da cera de fundição para fechar os furos correspondentes aos drenos e respiros. Este procedimento mostrou-se mais eficaz, reduzindo sensivelmente os problemas relacionados com inclusões de material cerâmico nas peças fundidas.

6.1.1.5 ONDULAÇÕES NA SUPERFÍCIE DOS PADRÕES

Este tipo de defeito foi observado em alguns padrões de fundição, especialmente nos que possuíam áreas planas relativamente grandes (tipicamente com mais de 10 cm²) e em paredes verticais.

No experimento I, este efeito manifestou-se mais pronunciadamente na peça *suporte de eixo* cuja geometria possuía grandes regiões planas, enquanto nas demais peças este efeito foi bem menos pronunciado ou praticamente imperceptível através de inspeção visual.

No experimento III, este tipo de defeito foi mais pronunciado nos padrões construídos com espessuras de parede muito finas, principalmente com $E_p = 0.30$ mm, sendo praticamente imperceptível nos padrões com $E_p = 0.45$ mm e $E_p = 0.60$ mm. Além destes, outros padrões afetados por este problema foram aqueles construídos com estrutura interna largamente espaçada, especialmente com $EEI = 6.0$ mm.

Estas ondulações apresentavam-se periódicas e regulares, correspondendo ao vergamento da superfície superior do padrão entre cada dois pontos de apoio da estrutura interna e nas paredes laterais dos padrões entre cada dois pontos onde a estrutura interna unia-se à parede do padrão.

A explicação mais provável para a ocorrência deste tipo de problema é o fato de a resina utilizada possuir um comportamento higroscópico, absorvendo grande quantidade de umidade quando exposta a um ambiente com alta umidade relativa do ar (tipicamente acima dos 50%) [31]. Além disso, os padrões QuickCast™ sofrem mais os efeitos da umidade devido à sua forma intrinsecamente oca, possuindo uma alta taxa superfície/volume, o que favorece a absorção da umidade. Esta umidade absorvida age na estrutura interna dos padrões provocando deformações (inchamento do retículo), empurrando as paredes do padrão e provocando as ondulações [1,39].

Observando-se em um microscópio verificou-se que estas ondulações apresentam períodos correspondentes ao espaçamento da estrutura interna do padrão, sendo que quanto maior fosse este espaçamento, mais pronunciadas eram as ondulações, ou seja, maior era a amplitude da onda.

Esta primeira hipótese é reforçada pelo fato de que ao sair da máquina os padrões não apresentavam qualquer distorção perceptível, porém, ao longo do tempo as ondulações tornavam-se cada vez mais visíveis e pronunciadas. Provavelmente, este efeito acentuava-se ainda mais durante a etapa de construção da casca refratária, pois a suspensão cerâmica utilizada para construir o molde possui água na sua composição, expondo o padrão QuickCast™ diretamente a um alto nível de umidade.

Este inchamento pronunciado da estrutura interna dos padrões também pode ter contribuído para a ocorrência de trincas e mesmo quebras em determinados locais no interior dos moldes cerâmicos, especialmente num momento em que poucas camadas de

material cerâmico tenham sido adicionadas ao molde. Nestas fases intermediárias de construção, o pequeno número de camadas adicionadas oferece pouca resistência à expansão dos padrões que acabam por trincar ou concentrar tensões vindo a partir durante a etapa de deceramento.

Um outro fator que pode ter influenciado o aparecimento de ondulações nas superfícies dos padrões é o tamanho das células que formam a estrutura interna de um padrão. Segundo JACOBS [37], quando uma célula é tornada grande demais, começa a se tornar importante o efeito do peso da superfície que é suportada pelas paredes da célula. Este efeito ocorre devido à distorção ou flambagem das superfícies superiores do padrão que funciona como uma superfície uniformemente carregada. Esta tendência foi observada nos ensaios realizados no experimento III, onde, com o aumento do tamanho das células percebeu-se também um aumento na amplitude das ondulações. Nos padrões construídos com espaçamento interno de 1.50 e 3.125 mm o efeito ondulatorio era sensivelmente reduzido quando comparado com espaçamentos de 6.0 mm.

6.1.2 Análise da Quebra das Cascas Cerâmicas

Quando um molde cerâmico contendo padrões de QuickCast™ em seu interior é colocado em uma autoclave ou forno de calcinação ele está sujeito a um aumento de temperatura, expansão térmica e grandes deformações. Como a diferença entre os coeficientes de expansão térmica da resina epóxi e do material cerâmico é da ordem de mais de dez vezes, o padrão de epóxi pode exercer considerável nível de tensões sobre a casca cerâmica.

Conforme apresentado no item 3.4.3 do capítulo III, a tensão na casca cerâmica, em regime de deformação elástica, é proporcional à sua deformação, que por sua vez, é proporcional à expansão térmica do padrão de resina, a qual depende da área da seção transversal do padrão. Conseqüentemente, seções espessas induzirão maiores tensões sobre a casca. As quebras ou trincas ocorrem quando estas tensões induzidas pela expansão térmica são maiores do que o módulo de ruptura do material cerâmico. Esta é a razão pela qual é indesejável a existência de seções espessas nos padrões de estereolitografia. Geralmente, estas seções espessas ocorrem devido a uma drenagem deficiente dos padrões.

6.1.2.1 ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A QUEBRA DA CASCA CERÂMICA

➤ Geometria dos Padrões QuickCast™

A geometria do padrão tem um impacto significativo sobre o grau de dificuldade em fundir peças usando padrões *QuickCast™*. Paredes muito finas e estreitas, cantos vivos e furos nos padrões atuam como concentradores de tensões e podem levar à trincas e quebras da casca cerâmica durante as etapas de aquecimento no processo de microfusão. Seções de paredes espessas e geometrias grandes tendem a dilatar-se mais sob efeito do calor, gerando altas tensões sobre as paredes do molde cerâmico.

➤ Eficiência na Drenagem dos Padrões QuickCast™

O estilo de construção QuickCast™ é baseado no conceito de drenagem da resina não curada do interior do padrão antes da etapa de pós-processamento, para que nenhuma seção sólida maior que uma espessura crítica (W_{CRIT}) permaneça em qualquer local dentro do padrão, aumentando com isso a probabilidade de sucesso no processo de microfusão.

➤ Topologia da Estrutura Interna dos Padrões QuickCast™

Entre os fatores geométricos que foram testados nos experimentos está a topologia da estrutura interna dos padrões. Como observado no capítulo III, a estrutura interna de um padrão QuickCast resulta da repetição de pequenas células com uma forma geométrica definida.

Verificou-se que a geometria destas células é um fator que exerce uma grande influência sobre a eficiência na operação de drenagem da resina e, conseqüentemente, na formação de seções sólidas espessas nos padrões. A figura 68 mostra as geometrias das células disponíveis para construir as estruturas internas dos padrões *QuickCast™*.

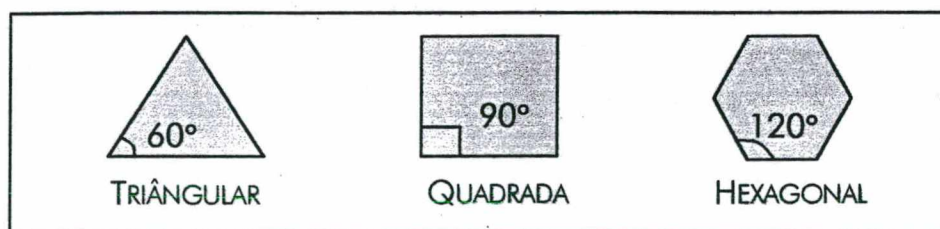


Figura 68 – Geometrias de células da estrutura interna dos padrões *QuickCast™*

Observando os ângulos internos destas células, nota-se que estes aumentam quando se passa de uma estrutura triangular para uma quadrada, e de uma quadrada para uma

hexagonal. Como as resinas fotopoliméricas possuem uma viscosidade finita e devido aos efeitos da tensão superficial, um menisco será obrigatoriamente formado entre cada duas paredes adjacentes. Conseqüentemente, uma quantidade de resina líquida não será capaz de fluir destes cantos, permanecendo no interior dos padrões, tendo um efeito negativo sobre a taxa de vazios.

Observando os dados da tabela 24 (resumidos do item 2 da tabela 10 – capítulo IV) pode-se notar que as taxas de vazios obtidas nos padrões construídos com células hexagonais são maiores do que para as células quadradas e significativamente maiores do que para os padrões construídos com células triangulares.

Tabela 24 - Medições na taxa de vazios em função da forma geométrica da estrutura interna dos padrões Quickcast™

Tipo de Estrutura Interna		Taxa de Vazios $R_v = 1 - (M_Q/M_S)$
Triangular Equilateral	Espaçamento da estrutura interna dos padrões <i>default</i> $E_{iA,B} = 3.125 \text{ mm}$	$R_{v,TE11} = 55,5\%$
		$R_{v,TE12} = 57,6\%$
Quadrada		$R_{v,TE13} = 64,0\%$
		$R_{v,TE14} = 64,1\%$
Hexagonal Regular		$R_{v,TE15} = 65,2\%$
		$R_{v,TE16} = 66,1\%$

Especificamente, os padrões com estrutura interna hexagonal têm demonstrado características de queima superiores e uma reduzida incidência de quebras da casca cerâmica. Isto deve ser, provavelmente, resultado de que células hexagonais e quadradas são estruturalmente menos rígidas do que o estilo triangular e, conseqüentemente, durante as etapas de autoclave e queima, a expansão térmica dos padrões com aquelas topologias produzem menos tensões sobre a casca cerâmica, colapsando mais facilmente.

➤ **Espaçamento da Estrutura Interna dos Padrões QuickCast™**

Uma outra característica construtiva testada nos experimentos deste primeiro estudo de casos foi o espaçamento da estrutura interna dos padrões. Os resultados obtidos com a variação destes parâmetros foram os seguintes: ao utilizar espaçamentos cada vez maiores, as taxas de vazios também resultaram mais altas, conforme mostrado na tabela 25, resultando em um maior rendimento na fundição.

Tabela 25 - Medições na taxa de vazios em função do espaçamento da estrutura interna dos padrões Quickcast™

Espaçamento da Estrutura Interna (mm)		Taxa de Vazios $R_v = 1 - (M_Q/M_S)$
Espaçamento de 1.25 mm	Tipo de estrutura interna dos padrões QuickCast™ HEXAGONAL	$R_{v,EEI1} = 40,2\%$
		$R_{v,EEI2} = 43,8\%$
$R_{v,EEI3} = 63,6\%$		
$R_{v,EEI4} = 66,9\%$		
$R_{v,EEI5} = 70,2\%$		
$R_{v,EEI6} = 72,5\%$		
Espaçamento de 3.125 mm (recomendado)		
Espaçamento de 6.0 mm		

Porém, enquanto o tamanho da célula aumentava, o “vergimento” gravitacionalmente induzido da superfície superior (insuficientemente apoiada) também aumentava, produzindo superfícies onduladas no padrão. Este problema foi observado nos padrões construídos com espaçamento de 6.0 mm. Nestes padrões, as superfícies superiores e paredes laterais resultaram bastante onduladas, no entanto, os resultados em termos das taxas de vazios foram muito bons (R_v acima de 70%). Este foi o dilema encontrado durante os experimentos: se o tamanho da célula for aumentado, a drenagem melhora, aumentando a taxa de vazios e isto contribui para uma melhora do rendimento no processo de fundição. Infelizmente, tamanhos de células maiores aumentam a tendência de vergamento da superfície superior, resultando em ondulações nestas superfícies.

A solução para este problema, a princípio, seria aumentar a espessura de parede dos padrões QuickCast™, mantendo um espaçamento grande da estrutura interna. Esta configuração, utilizando estruturas largamente espaçadas juntamente com espessuras de parede mais grossas foi testada na segunda fase de experimentos para fabricação de dos padrões de fundição dos insertos.

Em relação ao problema de quebras da casca cerâmica, os dois padrões construídos com espaçamento da estrutura interna de 1.50 mm (menor espaçamento) geraram tensões excessivas sobre as paredes do molde cerâmico causando fraturas localizadas nos pontos onde encontravam-se estes padrões, conforme pode ser visto na figura 69 mostrada a seguir.

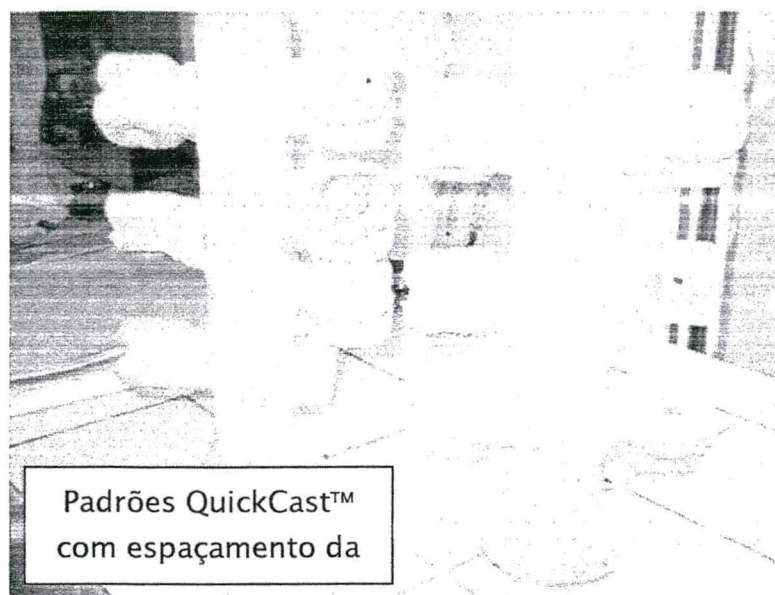


Figura 69 – Quebra da casca cerâmica devido à expansão térmica dos padrões QuickCast™

Possivelmente, a maior rigidez destes padrões provocaram a sua expansão excessiva causando a quebra da casca cerâmica na etapa de autoclave. Em um dos padrões construídos com espaçamento de 3.125mm, a sua expansão também causou pequenas quebras no interior do molde cerâmico, principalmente em locais de alta concentração de tensões. Já no padrão com espaçamento de 6.0 mm, a casca cerâmica não sofreu nenhum tipo de quebra, gerando uma peça fundida de boa qualidade, porém, apresentando ondulações em suas paredes verticais.

➤ **Espessura de Parede dos Padrões QuickCast™**

Como comentado anteriormente, quando foi utilizada uma espessura de parede da ordem de duas vezes a da espessura de uma camada ($2 \times 0.15 = 0.30\text{mm}$) os efeitos da ondulação foram muito mais intensos do que quando se utilizam camadas triplas (0.45mm) ou quádruplas (0.60mm). Isto acontecia porque uma casca simples, na superfície superior, é suportada apenas por uma célula subjacente. Como resultado, a superfície curva-se, tanto devido ao próprio peso, quanto a grande distância entre os apoios da superfície (paredes da célula). Entretanto, quando se utilizavam espessuras de parede superiores à 0.45mm, este efeito não era percebido. Isto provavelmente ocorria pelo fato de a primeira camada atuar como suporte para a próxima camada e assim por diante. Mesmo que a primeira camada da superfície superior se curvasse um pouco, a segunda camada ainda conseguia colar-se à primeira, reduzindo sensivelmente a sua curvatura em relação à primeira. O mesmo ocorrendo com as camadas subsequentes. Portanto, o uso de camadas triplas (0.45mm)

resultou em uma superfície bastante lisa, onde o efeito das ondulações foi praticamente imperceptível.

A relação entre a espessura de parede e a expansão térmica dos padrões, não ficou bem caracterizada nos ensaios realizados, devido ao baixo rendimento obtido. Não houve, nestes experimentos, uma relação entre a espessura de parede e quebras da casca cerâmica, pois, ocorreram lascamentos internos no molde tanto nos padrões construídos com paredes finas, quanto naqueles de paredes grossas. Assim, ensaios adicionais devem ser realizados para caracterizar melhor até que ponto a espessura de parede pode ser aumentada, sem que as tensões térmicas (causadas pela expansão do padrão) venham a trincar ou quebrar o molde cerâmico.

Certamente padrões mais robustos são desejáveis por serem capazes de manter a forma ao longo do tempo (estabilidade dimensional) e são mais resistentes à manipulação e aos efeitos indesejáveis da umidade. Todavia, estes padrões sofrem mais os efeitos da expansão térmica e tendem a exercer maiores tensões sobre o molde cerâmico durante os ciclos térmicos do processo de microfusão.

➤ Dimensionamento de Drenos e Respiros

A quantidade, dimensões e posicionamento dos drenos e respiros exercem também grande influência na drenagem dos padrões QuickCast™. Diâmetros muito pequenos para drenos e respiros, em geral menores que 4mm para os drenos e 2mm para respiros, não são recomendados para a resina SL 5170, pois a mesma tem dificuldades de atravessar estas passagens devido aos efeitos da tensão superficial e da viscosidade. Este foi o caso durante o experimento I, onde o sistema de drenos e respiros ficou subdimensionado ($\phi_{\text{DRENO}} = 3.6\text{mm}$ e $\phi_{\text{RESPIRO}} = 1.2\text{mm}$). Durante a experiência III foram utilizados diâmetros correspondentes à $\phi_{\text{DRENO}} = 5.0\text{mm}$ e $\phi_{\text{RESPIRO}} = 2.0\text{mm}$ e a drenagem melhorou significativamente.

Um outro problema de se utilizar diâmetros muito pequenos para drenos e respiros é que estes são, muitas vezes, difíceis de serem detectados, podendo ser negligenciados se não for identificada a sua localização, pois, se algum furo permanecer aberto o material cerâmico penetrará no interior do padrão, dando origem à inclusões de cerâmica na peça fundida e a conseqüente rejeição da mesma. O uso de diâmetros maiores facilita a drenagem da resina e a sua localização para vedação, entretanto, pode deixar marcas maiores na peça fundida e são mais difíceis de serem cobertos, pois a sua grande área dificulta a vedação.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS: FERRAMENTAL RÁPIDO

A tomada de decisão em relação a questão: se vale a pena ou não investir na tecnologia *QuickCast tooling* pode ser um grande desafio, pois, é muito difícil estimar exatamente as reais vantagens (ou desvantagens) quando se está considerando fatores de competitividade como o tempo e os custos de fabricação, bem como sua durabilidade e desempenho durante a operação, requisitos de qualidade dimensional e superficial, especialmente quando comparado à fabricação por métodos tradicionais, ou mais atualmente, com a usinagem em alta velocidade (*high speed cutting*). A discussão apresentada a seguir deverá abordar alguns destes tópicos com o intuito de fornecer subsídios para que se possa identificar as potencialidades desta técnica de *rapid tooling* para aplicação no processo de moldagem por injeção.

Porém, antes de iniciar a discussão em torno das potencialidades da técnica *QuickCast tooling* serão discutidos os resultados das experiências realizadas sobre a influência da etapa de deceramento no processo de microfusão utilizando padrões de estereolitografia (estudo de caso I).

6.2.1 A Influência da Etapa de Deceramento em Autoclave

O primeiro e mais contrastante resultado obtido nesta primeira parte do estudo de casos em ferramental rápido, foi a diferença em termos de qualidade das peças fundidas resultante da eliminação da etapa de deceramento no processo de microfusão como pode ser observado nas figuras 56 e 57 mostradas no capítulo V.

Como as autoclaves são comumente usadas por fundições para remoção da cera das árvores, é natural que também se use este processo para remoção destas estruturas quando se está utilizando padrões *QuickCast™*. Entretanto, conforme apresentado nos estudos de casos de fabricação de protótipos metálicos funcionais, a etapa de deceramento é uma das mais críticas em todo o processo, devido a grande expansão térmica dos padrões e ao tempo prolongado de exposição ao calor, o que muitas vezes, leva à trincas ou quebras na casca cerâmica.

Uma alternativa, usada para reduzir os problemas de quebras da casca cerâmica, seria enviar diretamente o molde cerâmico para a etapa de calcinação no forno de alta temperatura, ou seja, eliminar a etapa de deceramento do processo de microfusão. As consequências desta alteração assumem aspectos positivos e negativos: por um lado, a omissão desta etapa elimina os efeitos nocivos da expansão térmica dos padrões, restando apenas a expansão sofrida no forno de calcinação, que não é tão prejudicial, conforme será

explicado mais adiante neste capítulo. Entre os aspectos negativos desta alteração estão: o não reaproveitamento da cera que é queimada no forno de calcinação, produzindo fumos e contribuindo para um aumento na emissão de gases tóxicos para a atmosfera. Além disso, há um aumento dos custos associados ao não reaproveitamento da cera que é queimada. Apesar destes aspectos, os resultados obtidos com a eliminação da etapa de deceramento mostraram-se superiores ao processo tradicional de microfusão, onde, em nenhuma das peças fundidas ocorreram trincas ou microfissuras resultantes da expansão térmica dos padrões QuickCast™.

Uma possível explicação para este fato é que, quando as cascas cerâmicas são colocadas diretamente em um forno com temperaturas muito elevadas (em torno de 1600°C) os padrões e a cera proveniente da árvore são queimados em poucos segundos. Neste caso a temperatura de amolecimento da resina é atingida em poucos segundos, quando então, o padrão de resina deixa de exercer tensões sobre a casca cerâmica e passa a colapsar internamente.

Em contraste, o procedimento normal de microfusão novamente apresentou problemas de trincas e quebras da casca cerâmica. A quebra da casca cerâmica ocorreu na cavidade correspondente ao inserto fêmea do *botão regulador de temperatura* durante a etapa de deceramento. Nos ciclos em que são utilizadas autoclaves as temperaturas situam-se entre 100 e 120°C, sendo que a resina, nestas temperaturas, ainda não entra em combustão, mas exerce um alto nível de tensões térmicas sobre a casca cerâmica. Isto é ainda agravado pelo período de tempo relativamente longo (15 a 20 minutos) em que o sistema casca/padrões fica exposto a este nível de temperaturas.

Os resultados dos testes de laboratório apresentados no capítulo V podem auxiliar na compreensão dos fenômenos que ocorrem nesta etapa do processo de microfusão. Observando os resultados da análise termogravimétrica realizado com amostras da resina SL5170 (gráfico da figura 54), pode-se perceber que em temperaturas acima de 300°C a resina entra em combustão. Este nível de temperatura é superior à de amolecimento da resina e o padrão começa a colapsar internamente fazendo com que a expansão da resina diminua. A partir da temperatura de colapso da estrutura interna do padrão, já não há mais nenhuma tensão exercida sobre a casca, quer pela cera, quer pelos padrões QuickCast™. Como as cascas cerâmicas (contendo os padrões QuickCast™) são colocadas no forno já aquecido (a 1500 - 1600°C) o tempo estimado para atingir a temperatura onde a expansão da resina cessa (temperatura de colapso) é da ordem de alguns segundos. Este tempo

reduzido em que a casca cerâmica permanece sob ação das tensões térmicas provocadas pelos padrões, aumenta significativamente as chances de sobrevivência do molde cerâmico.

A conclusão obtida com os ensaios realizados é que é necessário alterar as condições do processo de deceramento utilizadas ou desenvolver métodos alternativos para extrair a cera do interior da casca cerâmica para conseguir um maior rendimento nesta etapa do processo de microfusão. Além disso, testes adicionais com outras geometrias e tamanhos diferentes são requeridos para comprovar a tendência de melhoria do rendimento com a eliminação da etapa de deceramento.

A seguir são analisados os resultados obtidos com a fabricação de insertos para moldes de injeção de plásticos pela técnica *QuickCast tooling* considerando aspectos técnicos, de custos e de tempo de fabricação.

6.2.2 Avaliação da Técnica QuickCast Tooling sob Aspectos Técnicos

6.2.2.1 CONTROLE DIMENSIONAL

Conforme pode-se observar nos dados das tabelas 18 e 19 e figuras 62 e 63 (capítulo V), os insertos fabricados pela técnica *QuickCast tooling* apresentaram faixas de tolerâncias variando desde 4 centésimos de milímetro para algumas dimensões até próximo de 40 centésimos em outras. Esta grande variabilidade nas tolerâncias obtidas resulta, preponderantemente, da dificuldade em controlar os fatores de contração existentes nas diversas etapas do processo de fabricação e, conseqüentemente, atingir as tolerâncias exigidas pela indústria de moldes, principalmente porque o fenômeno da contração possui um comportamento aleatório e é fortemente dependente da geometria da peça.

Na maioria das vezes considera-se a hipótese de que a contração é perfeitamente isotrópica, isto é, idêntica em todas as direções, entretanto, isto não é verdade para a maioria dos casos reais. Em muitos casos a aplicação de um único fator de compensação da contração para toda a peça é insuficiente, principalmente quando se está gerando padrões para produção de insertos para moldes de injeção.

De acordo com JACOBS [45], se for assumido que a componente aleatória da contração obedece as estatísticas Gaussianas e que uma tolerância aceitável no ferramental seria de $\pm \epsilon_T$ (tolerância), para uma dimensão de comprimento "L", um critério razoável para um nível permissível de ruído aleatório na contração poderia ser escrito como:

$$|\dot{\varepsilon}| = 3 \cdot \sigma \cdot L \quad (6.1)$$

Esta relação assegura que dentro de três vezes o desvio padrão multiplicado pela dimensão relevante é menor ou igual ao valor absoluto da tolerância no ferramental, então, mais de 99,7% de todas as dimensões devem ficar dentro daquela tolerância.

Assumindo que $L_{MAX} = 500\text{mm}$ bastaria para a grande maioria das aplicações em ferramental, então o desvio padrão (σ) permissível para o processo de contração seria:

$$\sigma = 0.05 / 3 \cdot 500 = 0.000033 = 0.0033\%$$

Um valor de 0.0033% em 500mm é igual a 0.0167mm (equivalendo a $\pm 1\sigma$). Para (3σ) teríamos $3 \times 0.0167 = 0.0508\text{mm}$. Isto implica que 99,7% de todas as medições estarão dentro da tolerância especificada. Este é o nível de incerteza na contração requerido para a fabricação de ferramentas por técnicas de ferramental rápido. Infelizmente, a contração para um dado processo teria que ser cotada, por exemplo, como $0.037 \pm 0.003\%$.

Entretanto, segundo [45], no estado da arte atual dos processos existentes de prototipagem rápida e microfusão, nenhuma destas tecnologias começaram a especificar a contração com um nível tão baixo, ou com este nível de significância estatística.

Outros fatores que influenciaram na incerteza dimensional dos insertos e, conseqüentemente, das peças injetadas foram:

- *Acabamento superficial* – Durante esta etapa, uma pequena quantidade de material foi removida tanto dos padrões QuickCast™ como dos insertos fundidos visando obter uma peça injetada com boa aparência estética.
- A instabilidade dimensional dos padrões QuickCast™ devido à absorção de umidade por parte da resina utilizada.

A variação dimensional devido a absorção de umidade ocorre, principalmente, durante a etapa de formação da casca cerâmica, onde os padrões QuickCast™ estão sujeitos a ambientes com alto índice de umidade. Entretanto, durante esta etapa não foi possível medir a variação dimensional pelo fato de os padrões estarem envolvidos pela casca cerâmica. Porém, sabe-se que a resina epóxi utilizada neste trabalho é altamente higroscópica e que, de acordo com testes realizados com esta resina, a umidade absorvida provoca uma variação dimensional nas peças fabricadas.

6.2.3 Avaliação da Técnica QuickCast Tooling sob Aspectos de Custos e Tempo de Fabricação

Para que um novo processo de fabricação de ferramentas venha obter sucesso e seja incorporado aos meios de produção por empresas deste setor, necessariamente ele deve oferecer vantagens claras em termos de custos e tempo de fabricação em relação aos processos existentes e já consagrados. Sob este ponto de vista, torna-se evidente a necessidade de considerar, além dos aspectos técnicos, fatores econômicos e de tempo para que uma avaliação mais efetiva e realística seja executada.

Para realizar a comparação entre os métodos tradicional e o *QuickCast tooling* foi necessário determinar os custos aproximados envolvidos em cada uma das etapas do processo de fabricação. Os elementos essenciais que envolvem o cálculo dos custos de fabricação para ambos os métodos foram mostrados nas tabelas 22 e 23 (capítulo V). Estes elementos servirão como base para uma análise comparativa entre os métodos convencionais e o método proposto nesta pesquisa.

As figuras 70 e 71 apresentam dados comparativos entre os tempos e custos envolvidos na fabricação do conjunto de oito insertos para os dois métodos de fabricação.

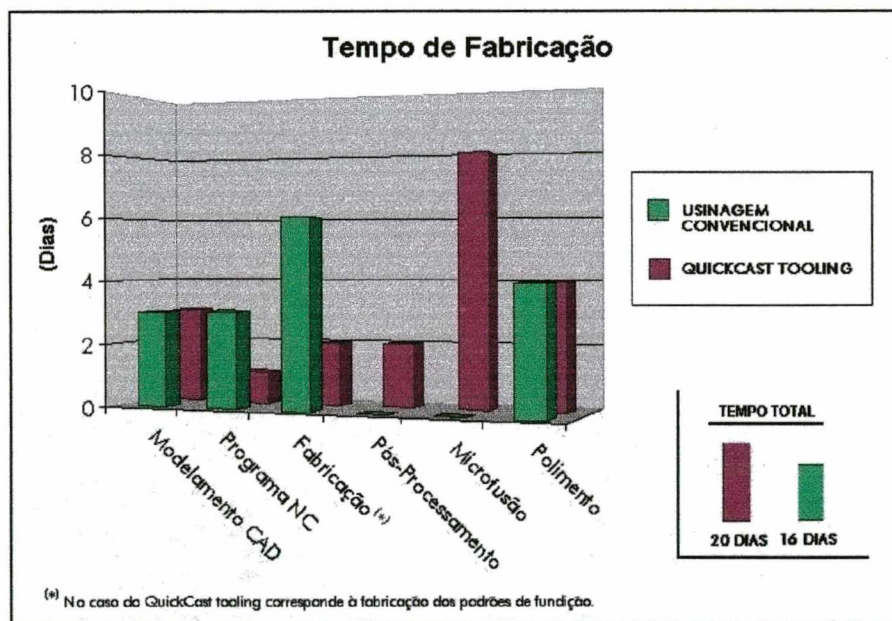


Figura 70 - Gráfico comparativo de tempo de fabricação: método convencional x QuickCast Tooling

A etapa de projeto e modelamento geométrico 3D dos insertos é normalmente a mesma para ambos os métodos de fabricação. Observando o gráfico da figura 70 nota-se que a primeira diferença em relação ao tempo entre os dois métodos está na geração do programa NC para construção dos insertos. O processo de geração das trajetórias de

usinagem e do programa de comando numérico nas máquinas CNC é um pouco mais demorado do que para os sistemas de prototipagem rápida. Em quase todos os sistemas CAD/CAM disponíveis para usinagem esta é uma tarefa que consome tempo pois envolve várias decisões:

- determinação das estratégias de usinagem
- seleção dos parâmetros de trabalho (avanço, velocidade, tolerâncias, etc.)
- determinação/fabricação de ferramentas, fixação, setup, etc.

A preparação da máquina também requer algum tempo, especialmente quando há muitas trocas de ferramentas ou para reposicionamento da peça. Entretanto a maior parte do tempo gasto neste método de fabricação é com a própria operação de usinagem que requer muita experiência e conhecimentos específicos.

Uma observação importante a ser feita é que a etapa de “fabricação” pela técnica *QuickCast tooling*, mostrada nas figuras 70 e 71, correspondeu ‘apenas’ à fabricação dos padrões de fundição, não incluindo a etapa de microfusão (apesar de fazer parte do processo de fabricação). Esta separação foi propositalmente efetuada com a finalidade detalhar melhor os custos nas diversas etapas da fabricação. Portanto, somando os tempos correspondentes às diversas etapas do processo de fabricação dos insertos *QuickCast™*, resulta em um tempo superior ao da usinagem CNC.

Na figura 71 a seguir é mostrado um gráfico comparativo dos custos envolvidos na fabricação dos oito insertos através dos dois métodos.

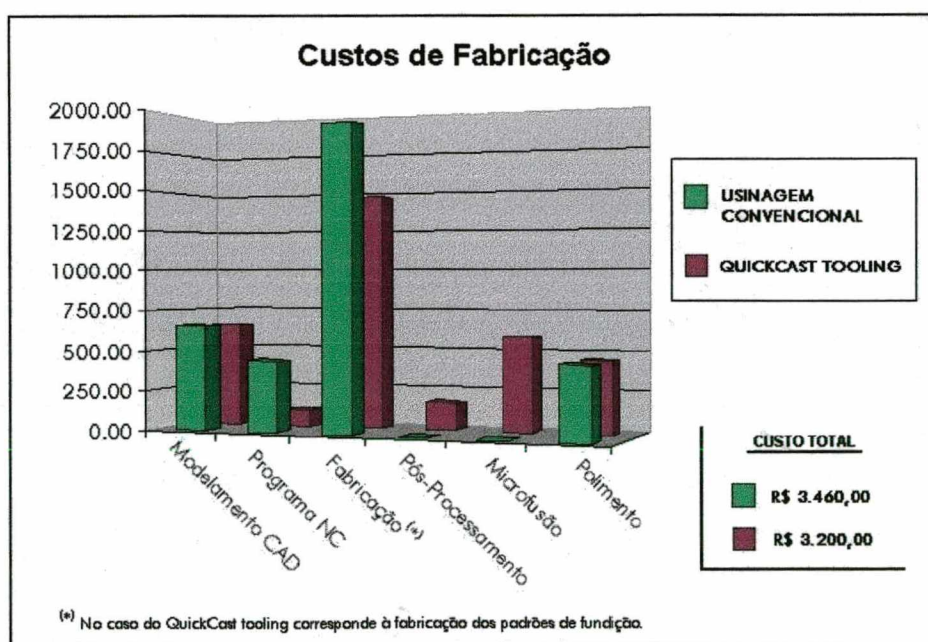


Figura 71 - Gráfico comparativo dos custos de fabricação: método convencional x QuickCast Tooling

A análise dos dados da figura 71 mostra uma pequena diferença, favorável ao método *QuickCast tooling*, entre os custos estimados a partir dos estudos de caso para as duas geometrias de peças proposta. Esta vantagem da técnica de *rapid tooling* em relação ao método convencional é verificada principalmente em situações onde:

- *O número de insertos (ou o número de cavidades do molde a ser fabricado) for grande, tipicamente, 4 cavidades ou mais, dependendo da complexidade da peça a ser injetada. Isto se deve ao fato de que o tempo para se fabricar 'apenas um inserto' pela técnica QuickCast é praticamente o mesmo de se fabricar um certo número deles, quando estes podem ser construídos simultaneamente. Isto é bastante relevante especialmente na etapa de microfusão que é a que consome mais tempo em todo o processo de fabricação.*
- *Quando a geometria dos insertos a serem fabricados for mais complexa, pois o potencial da prototipagem rápida está justamente na facilidade em construir formas geométricas complexas.*

O próximo capítulo apresentará as principais conclusões em relação aos estudos realizados neste trabalho, identificando os pontos mais críticos das aplicações estudadas, suas vantagens e desvantagens, bem como propostas de melhorias e sugestões para novas pesquisas e trabalhos nas áreas de prototipagem rápida e *rapid tooling*.

Capítulo

7

Conclusões

© 2010, WILEY-INTERSCIENCE

As discussões apresentadas nos capítulos anteriores mostraram alguns aspectos ou fatores que influenciam no rendimento e qualidade das peças obtidas pela técnica de microfusão através do uso de padrões QuickCast™, bem como, buscou identificar as potencialidades de se utilizar as tecnologias de estereolitografia e microfusão na fabricação de insertos para moldes de injeção de plásticos.

Verificou-se através dos estudos de casos que, apesar de os algoritmos de construção da estrutura interna fornecerem padrões funcionais, existe ainda muito espaço para melhorias através da otimização dos parâmetros de construção destes padrões. É importante que os padrões sejam projetados para possuir características de rapidamente colapsar durante a etapa de queima, além de possuir um bom acabamento superficial, boa integridade estrutural e boa estabilidade dimensional, sem torná-lo frágil demais.

Os estudos de casos destinados à fabricação de protótipos metálicos funcionais serviram para mostrar que, apesar das vantagens da natureza semi-oca dos padrões QuickCast™, o processo de remoção da cera do interior da casca cerâmica ainda é bastante problemático e cuidados especiais devem ser tomados para evitar ou minimizar a incidência de trincas e quebras da casca cerâmica. É necessária uma investigação extensiva nesta etapa do processo de microfusão para compreender melhor o mecanismo que leva à fratura do molde cerâmico quando se está utilizando padrões de estereolitografia.

Através da análise dos parâmetros de construção estudados neste trabalho, concluiu-se que a resina líquida fluirá mais facilmente do interior dos padrões se as linhas que formam a malha da estrutura interna dos padrões estiverem mais espaçadas. Entretanto, espaçamentos muito grandes resultaram em uma baixa integridade estrutural. Os padrões QuickCast™ requerem uma resistência mínima para evitar distorções quando estão no estado “verde” (isto

é, durante a construção do padrão e na remoção dos suportes). Além disso, mesmo depois de curados, os padrões devem suportar as forças impostas pela manipulação e ao longo das etapas do processo de microfusão. Melhorias em termos de resinas menos higroscópicas também são fundamentais para tornar o processo mais confiável e preciso.

Outra limitação identificada nos estudos de casos realizada está na qualidade das superfícies superiores e laterais dos padrões quando o espaçamento da estrutura interna é aumentado, pois, estas superfícies tendem a vergar devido ao próprio peso, fazendo com que a qualidade superficial diminua. A forma geométrica do retículo que constitui a estrutura interna dos padrões é outro parâmetro que exerce grande influência sobre a eficiência na drenagem dos padrões *QuickCast™*. Os testes experimentais mostraram que o uso de estruturas triangulares retardam o fluxo de resina através das células, além de reterem maior quantidade de resina líquida entre suas paredes, quando comparado às formas hexagonal e quadrada de áreas equivalentes. Além disso, hexágonos e quadrados são, intrinsecamente, menos rígidos que triângulos equiláteros, conseqüentemente, durante as etapas de deceramento e queima, a expansão térmica destes padrões produz menos tensões sobre a casca cerâmica, colapsando mais facilmente.

Em relação aos estudos de casos de ferramental rápido, verificou-se que, de maneira geral, os resultados obtidos nos ensaios práticos foram, na maioria das vezes, inferiores quando comparados com o método tradicional, tanto sob o ponto de vista técnico como em termos de custos e de tempo de fabricação. Para os aspectos geométricos e dimensionais, maior dificuldade encontrada foi controlar os fatores de contração existentes nas diversas etapas do processo de fabricação e, conseqüentemente, atingir as tolerâncias exigidas pela indústria de moldes, principalmente porque o fenômeno da contração possui um comportamento aleatório e é fortemente dependente da geometria da peça. Outro elemento que influenciou na precisão dimensional dos insertos foi a operação de acabamento superficial, especialmente na etapa de pós-processamento e polimento dos padrões *QuickCast™* para a remoção dos “degraus de escada” resultante do processo de fabricação por camadas. Diferentemente do que ocorre com o aço, a remoção de material nos padrões é bastante significativa, sendo dependente, essencialmente, da habilidade da pessoa que executa esta operação.

Em relação à qualidade superficial dos insertos fabricados, a existência de porosidade na superfície dos fundidos contribui como um aspecto negativo na comparação com o método tradicional, pois acrescenta mais tempo ao processo global para reparo da superfície, além de

prejudicar o aspecto visual das peças injetadas. Novamente, neste caso, a porosidade superficial é um fenômeno difícil de controlar, pois depende de inúmeros fatores.

Um segundo grupo de fatores avaliados foi o tempo e os custos de fabricação dos insertos. No aspecto tempo de fabricação, novamente, os estudos de casos revelaram um desempenho inferior da técnica *QuickCast tooling* em relação ao método convencional conforme apresentado na figura 70. Neste sentido, é importante destacar a parcela consumida no processo de microfusão, correspondendo a aproximadamente 40% do tempo total de fabricação dos insertos. Este tempo excessivo deve-se principalmente ao tempo necessário para secagem da casca cerâmica até que uma nova camada de material seja adicionada. Além disso, esta técnica de ferramental rápido apresenta duas etapas a mais do que o processo convencional, adicionando mais tempo ao processo global.

Igualmente importante são os custos dispendidos na fabricação do ferramental. Os fatores essenciais que compõem os custos estão relacionados com a cadeia do processo e com os custos indiretos, conforme mostrado nas tabelas 22 e 23. Novamente, as etapas extras existentes na técnica *QuickCast tooling* acrescentam custos ao processo como um todo tornando-o mais dispendioso conforme mostrado no gráfico comparativo de custos da figura 71. Também para a análise dos custos é importante evidenciar a parcela associada à fabricação dos padrões de fundição, correspondendo a mais de 40% do custo total. Os altos custos existentes nesta etapa do processo deve-se à alta taxa custo/hora do equipamento de estereolitografia e aos preços demasiadamente altos das resinas importadas de outros países.

Portanto, apesar da reduzida quantidade de estudos de casos realizados e da pequena variedade de tamanhos e complexidades testadas, os experimentos realizados mostraram que, no estado atual de desenvolvimento, a técnica *QuickCast tooling* não é viável segundo os critérios estabelecidos no escopo deste trabalho para criação de ferramentas destinadas ao processo de moldagem por injeção. Entretanto, os dados de tempo de fabricação apresentados para os estudos de casos de ferramental rápido não consideram os problemas associados com a curva ascendente (curva de aprendizado) para toda primeira vez que se realiza um experimento. Uma vez que o processo esteja bem definido e informações adicionais tenham sido geradas em relação à fatores de contração, melhorias na habilidade de preparar e pós-processar os padrões de estereolitografia, a economia de tempo em relação ao método convencional pode tornar-se significativa.

SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Visando dar continuidade aos trabalhos realizados nesta área de pesquisa, são sugeridos aqui alguns temas para realização de trabalhos futuros:

- Avaliar a utilização de padrões destinados ao processo de microfusão, fabricados por outras técnicas de prototipagem rápida, como, por exemplo, SLS, FDM, MJM, 3D Printing, LOM, etc., comparando estas técnicas com a de estereolitografia, sob aspectos de precisão dimensional, acabamento superficial, rendimento no processo de microfusão, aplicabilidade em ferramental rápido, entre outros.
- Estudar a influência das diferentes técnicas de acabamento superficial para os padrões de SL como: jateamento em areia, lixamento, polimento com pastas abrasiva, polimento por vibração, etc., na qualidade final das peças fundidas.
- Avaliar a potencialidade de fabricação de eletrodos, para eletroerosão por penetração, utilizando padrões QuickCast™ e o processo de microfusão.
- Caracterizar a influência da absorção de umidade pela resina fotopolimérica, usada para construir os padrões de fundição, na precisão e/ou estabilidade dimensional dos padrões durante as diversas etapas do processo de fabricação de protótipos metálicos fundidos.
- Investigar a influência dos diferentes tipos de resinas fotopoliméricas, utilizadas para construir padrões de fundição, sobre o comportamento de queima, taxas de vazios, expansão térmica, rendimento na fundição, entre outros.
- Estudar a influência de diferentes condições do processo de deceramento em autoclave (temperatura, pressão do vapor, tempo de deceramento) sobre a expansão térmica dos padrões QuickCast™ no interior de moldes cerâmicos.
- Avaliar métodos alternativos para extração da cera do interior das cascas cerâmicas, de forma a minimizar ou eliminar os efeitos nocivos da expansão térmica dos padrões causados pelo aquecimento no interior das atuais autoclaves a vapor.
- Realizar um estudo detalhado sobre as tolerâncias possíveis de se obter durante as diversas etapas do processo de fabricação dos protótipos metálicos fundidos, utilizando padrões QuickCast™.

Capítulo

8

Referências Bibliográficas

- [1] 3D Systems Inc. “**Cibatool® Resin Handbook**”, Valencia-CA, USA, nov 1997.
- [2] 3D Systems Inc. “**SLA User Reference Manual**”.
- [3] 3D Systems, Inc. “**Stereolithography Interface Specification**”, July 1988.
- [4] 3D Systems, Inc. “**Maestro Workstation User Guide**”, chapter 2, pp. 23-25, 1998.
- [5] ASM – Metals Handbook, “**Forging and Casting**”, vol.5,. 8 ed., pp. 237-292, Metals Park, Ohio, 1970.
- [6] BARLOW J.J., SUN M.S.M. and BEAMAN J.J. “**Analysis of Selective Laser Sintering**”, *Proceedings of the Second International Conference on Rapid Prototyping*, June 23-26: 1-14, 1991.
- [7] BAXTER M. “**Projeto de Produto: Guia Prático para o Desenvolvimento de Novos Produtos**”, 1 ed., *Edgard Blücher Editora Ltda*, São Paulo - SP, 1998. ISBN 85-212-0150-8,
- [8] BLAIR B.M. “**Post-Build Processing of Stereolithography Molds**”, *Master Thesis*, Georgia Institute of Technology, USA, May 1998.
- [9] BLAKE P., “**The applications and Benefits of Rapid Prototyping at Texas Instruments Inc.**”, *Proceedings of the First European Conference on Rapid Prototyping*, University of Nottingham, Nottingham, England, July 6-7, pp. 267-288, 1992.
- [10] BLAKE P., BAUMGARDNER O., HABURAY L., and JACOBS P., “**Creating Complex Precision Metal Parts Using QuickCast**”, *Proceedings of the SME – Rapid Prototyping and Manufacturing Conference*, Dearborn, Michigan, April 26-28, 1994.
- [11] CAD/CAM Publishing, Inc., “**Rapid Prototyping Report**”. 4(1), January 1994.

- [12] CHUA, C. K. and LEONG K.F. "**Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing**", *Nanyang Technological University*, John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 1997, ISBN 0-471-19004-7.
- [13] COWIE A.P. "**Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English**", *Oxford University Press*, 4th edition, Oxford, 1989.
- [14] CRUMP S. "**The extrusion of Fused Deposition Modeling**", *Proceedings 3rd International Conference Rapid Prototyping*: 91-100, 1992.
- [15] CULLIN, J. "**Time Compression**". *IEE – Manufacturing Engineer*, London – UK, v.75, n.5, p.244, Oct 1996.
- [16] DENTON, K. and JACOBS P.F., "**QuickCast & Rapid Tooling : A case History at Ford Motor Company**", *Proceedings of the third European Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing*, University of Nottingham, Nottingham, England, 6-7 July, 1994, pp.53-72.
- [17] DICKENS P.M. "**Rapid Tooling Techniques**", *Proceedings of Euromold'99 Conference*, RP's Strategic Benefits and Risks, Frankfurt, Germany, Dec 1999.
- [18] DICKENS, P.M.; SMITH, P.J. "**Stereolithography Tooling**", *Proceedings of 1st European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, University of Nottingham, pp. 309-317, July 1992.
- [19] DICKENS P.M., COBB R.C. and SPENCER J.D. "**Finishing Stereolithography Models**" EDS Seminar on Rapid Prototyping, Working, 13 July 1993.
- [20] DICKENS P. M., "**Rapid Prototyping for Investment Casting**", *Metallurgia*, vol.60, N° 6, 213-214, June 1993.
- [21] DICKENS P. M. et. Al. "**Conversion of RP Models to Investment Castings**", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 1, N° 4, pp. 4-11, 1995, ISSN 1355-2546 Refereed.
- [22] DOLENC A. and MÄKELÄ I. "**Efficient Data Transfer and Data Preparation for Rapid Prototyping**", *Institute of Industrial Automation*, Helsinki University of Technology, April, 1995.
- [23] DTM Corporation, "**Sinterstation 2000**", *Product Brochure*, 1995.
- [24] Dupont/DSM SOMOS, "**Catálogo de Resinas**", USA, Sep. 1999.
- [25] FERREIRA, A.C. e LAFRATTA, F.H. "**Conheça Alguns Meios para a Obtenção de Protótipos de Peças Injetadas**", *Plástico Industrial*, Aranda Editora Técnica Ltda, São Paulo-SP, Brasil, setembro, 1998.
- [26] FERREIRA, A. C., AHRENS, C.H., LAFRATTA, F.H. e GOMIDE, R.B. "**Stereolithography Tools for Injection Molding of Wax Patterns in the Investment Casting Industry - A Case Study**", *Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing 2000*, Society of Manufacturing Engineers - SME, Chicago, IL, USA, April, 2000.

- [27] FEYGIN M. "Apparatus and Method for Forming an Integral Object from Laminations". *U.S Patent n.4,752,352*, 21/06/98.
- [28] FLINT, R. "Functional Prototypes via Rapid Prototyping". *Rapid Prototyping – SME*. Vol.1, n.1, 1°. Trimestre 1995.
- [29] FORCELLINI, F., BACK N. "Projeto Conceitual". *Apostila de Projeto Conceitual*, Universidade Federal de Santa Catarina, depto. Eng. Mecânica, 1998.
- [30] FRANK, D. and FADEL G.M. "Preferred direction of build for rapid prototyping processes". In *Proc., 5th International Conference on Rapid Prototyping*. Dayton, OH, 1994.
- [31] GOMIDE R.B., GRELLMANN D.A., BEAL V.E., AHRENS C.H., FERREIRA A.C. "Estudo da Incerteza Dimensional e Absorção de Umidade em Peças Fabricadas por Estereolitografia", *VII Semana da Pesquisa*, UFSC, Florianópolis-SC, Brasil, set.1999.
- [32] GOMIDE R.B., GRELLMANN D.A., BEAL V.E., AHRENS C.H., FERREIRA A.C. "Desenvolvimento de um Forno de Radiação Ultravioleta para Pós-Cura de Peças Fabricadas por Prototipagem Rápida Através da Estereolitografia", *VII Semana da Pesquisa*, UFSC, Florianópolis-SC, Brasil, set.1999.
- [33] HAGUE R. and DICKENS P.M. "Requirements for the Successful Autoclaving of Stereolithography Models in the Investment Casting Process", *Second National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research*, Buckinghamshire College, UK, pp. 77-92, 1996.
- [34] HARADA, J. "Moldagem por Injeção: Projetos e Princípios Básicos", *Medialdea Editora Ltda*, São Paulo, 1991.
- [35] HULL C., JACOBS P. F., "Stereolithography and QuickCast: Moving Towards Rapid Tooling", *from 3D Systems "Foundry Reports"*, Valencia, CA, June 1995.
- [35] IPPOLITO R., IULIANO L. and GATTO A. "Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish", *Annals of the CIRP*, vol.44, Jan 1995.
- [36] JACOBS P.F. "Rapid Prototyping & Manufacturing, Fundamentals of Stereolithography", *Society of Manufacturing Engineers*, USA, 1992.
- [37] JACOBS, P.F. "Stereolithography and Other RP&M Technologies – From Rapid Prototyping to Rapid Tooling", *Society of Manufacturing Engineers*, ASME Press, New York – USA, 1996. ISBN 0-87263-467-1.
- [38] JACOBS, P.F., "Recent Advances in rapid tooling from Stereolithography", *Proc. 7th Int. Conf. on Rapid Prototyping*, March 31 –April 3 1997, San Fransisco, Ed. By Lightman, A.J. et. al., p338-354.
- [39] JACOBS P. F., "Stereolithography 1993: Epoxy Resins, Improved Accuracy & Investment Casting", *from 3D Systems "Foundry Reports"*, Valencia, CA, 1993.

- [40] JACOBS P. F., “**Recommended Foundry Procedure for Shell Investment Casting Using QuickCast™ Stereolithography Patterns**“, *from 3D Systems “Foundry Reports”*, 3D Systems, Valencia CA, April, 1993.
- [41] JACOBS P. F., “**QuickCast: Foundry Reports**“, *from 3D Systems “Foundry Reports”*, Valencia, CA, April, 1993.
- [42] JACOBS P.F., “**QuickCast 1.1 & Rapid Tooling**“, *3D Systems Report*, Valencia, CA, 1994.
- [43] JACOBS P.F., “**Rapid Tooling: The Process**“, *Feature Report*, March, 1994.
- [44] JACOBS, P.F. “**Success of Rapid Prototyping by SL Leads to Next Step: Rapid Tooling**“, *International News Magazine of Investment Casting Institute*, p.21, Dallas, TX – USA, July 1995.
- [45] JACOBS, P.F. “**The Effects of Shrinkage Variation On Rapid Tooling Accuracy**“, www.expresstool.com/news_3.htm, consultado em 16/06/99.
- [46] JAMIESON R. and HACKER H. “**Direct slicing of CAD models for rapid prototyping**“, *Rapid Prototyping Journal* 1(2), 1995.
- [47] JURRENS K.K. “**An Assesment of the State-of-the-Art in Rapid Prototyping Systems for Mechanical Parts**“, *Final Report*, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, USA, Dec. 1993.
- [48] KENNERKNECHT S., “**Rapid Prototyping Based Rapid Prototyping for Aluminum Investment Casting Using QuickCast Patterns**“, *from 3D Systems “Foundry Reports”*, Ibid, April, 1993.
- [49] KENNERKNECHT S., and SARKIS B., “**Rapid Prototype Casting (RPC): The Fundamentals of Producing Functional Metal Parts from Rapid Prototipe Models Using Investment Casting**“, *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping*, University of Dayton, Dayton, OH, June 12-15, 1994.
- [50] KOCHAN D. and CHUA C.K. “**State-of-the-Art and Future Trends in Advanced Rapid Prototyping and Manufacturing**“, *International Journal of Information Technology* 1(2): 173-184, 1995.
- [51] KRUTH J.P. “**Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques**“, *Keynote Papers*, Katholieke Universiteit Leuven/Begium, Annals of the CIRP, vol.40, Fev de 1991.
- [52] LÄTCHEN, M. “**Invest In – On-Offs**“. *Prototyping Technology International '98*, UK & International Press, p.193-195, 1998.
- [53] LEU M.C., YANG B., YAO W., “**A Feasibility Study of EDM Tooling Using Metalized Stereolithography Models**“, *North America Manufacturing Research Conference*, Atlanta, GA, May 19-22, 1998.

- [54] LIGHTMAN A. and COHEN A. "Alternate Approaches to RP&M", chapter 16, Jacobs, op. Cit., pp.397-423.
- [55] LOSSE, K. "Investigation of Optimum Process Parameters for Burnout of SLA Parts for Manufacturing of Metallic Parts Through Investment Casting", *Proceedings Prototype Research and Manufacturing*, SME, Dearborn, MI, April 23-25, 1996.
- [56] MAGUIRE M. C., BALDWIN D., ATWOOD C. L. and PARDO B. T. "Rapid prototyping technologies and their application to metalcasting". American Metalcasting Consortium, 1995.
- [57] MALLOY, R.A. "Plastic Part Design for Injection Molding", *Hanser/Gardner Publications*, ISBN 1-56990-129-5, New York, USA, 1994.
- [58] MARIA, R. B. "Relatório de estágio I: Multibrás Eletrodomésticos S.A – Setor de Protótipos", *Depto. Eng. Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina*, Florianópolis-SC, Brasil, Dez. 1998.
- [59] MARTIN J., SAUER J., "Strength of Materials", *The Macmillian Co.*, New York, NY, 2nd. Ed., pp. 144-481, 1954.
- [60] MCDOWELL C. S., BOOMER, M. C., "Design of Stereolithography Trees for Use in Investment Casting of Stereolithography Patterns", *Solid Free Form Fabrication Symposium*, Austin, Texas – USA, 1996.
- [61] MENGES, G. MOHREN, P. "How to Make Injection Molds", *Hanser/Gardner Publications*, 2 ed., ISBN 3-446-16305-0, New York, USA, 1993.
- [62] METELNICK J. "How today's model/prototype shop helps designers use rapid prototyping to full advantage", *Society of Manufacturing Engineers*, Technical Paper, (1991)MS91-475.
- [63] MONTGOMERY D. C. "Design and Analysis of Experiments", John Wiley & Sons, Inc. 4 ed., ISBN 0-471-15746-5, USA, 1997.
- [64] MORRIS, J.L. "Metal Castings", *Georgia Institute of Technology*, Ed. Prentice Hall, 2 ed., USA, 1964.
- [65] Norma Técnica DIN 1680/Parte2
- [66] PACHECO J. "State of the Art Review: Rapid Prototyping for Manufacturing", IIT Research Institute, <http://www.mtiac.hq.iirti.com/MTIAC/pubs/rp/rp1.htm>, march 1993.
- [67] PADOVANI, B. "Prototipagem Rápida: Uma Visão dos Mercados Mundial e Brasileiro", *Seção Técnica*, Congresso Internacional de Novas Tecnologias em Processos de Fabricação e Projeto de Máquinas, Joinville-SC, Brasil, set.1999.
- [68] PEARSON, R. E., "Use of Rapid Prototyping in the Investment Casting Industry", *Job Shop Technology Magazine*, April, 1994.

- [69] PHAM, D.T., DIMOV, S., LACAN, F. "**Firm Tooling – Bridging the Gap Between Hard and Soft Tooling**". *Prototyping International '98*, UK & International Press, p.196-203, 1998.
- [70] RAHMATI, S. and DICKENS, P.M. "**Rapid Prototyping & Rapid Tooling**", *Precision Toolmaker*, September 1995, 186 - 188.
- [71] REES H. "**Mold Engineering**", *Hanser/Gardner Publications Inc.*, ISBN 3-446-17729-9, Ohio, USA, 1995.
- [72] SCHLICHTING H., "**Boundary Layer Theory**", *McGraw-Hill*, Chapter 1, New York, NY, pp.10-11, 1960.
- [73] SEGAL J. "**Rapid Tooling Applications and Case Studies**", *Proceedings of Euromold'99 Conference*, RP's Strategic Benefits and Risks, Frankfurt, Germany, Dec 1999.
- [74] SMITH J., HANSLITS M., "**Allied Signal Impeller Shroud: Rapid Prototype Pattern Evaluation for Investment Casting**", *Ibid*, April, 1993.
- [75] STARKEY G. "**Rapid Technologies for Tooling Applications**", *Proceedings of Euromold'99 Conference*, RP's Strategic Benefits and Risks, Frankfurt, Germany, Dec 1999.
- [76] SUN M.S.M., NELSON J.C., BEAMAN J.J. and BARBOW J.J. "**A model for Partial Viscous Sintering**" *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas, 1991.
- [77] THOMPSON D. C. and CRAWFORD R. H. "**Optimizing part quality with orientation**" *Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 1995.(25)
- [78] "**Tool and Manufacturing Engineers Handbook**", *Society of Manufacturing Engineers – SME*, Forming, 4ed., vol. 2, chap. 16, pp. 57-61, Dearborn, Michigan – USA, 1984.
- [79] VOLPATO, N. "**Prototipagem Rápida e Ferramental Rápido no Processo de Desenvolvimento de Produtos**", *Revista Máquinas e Metais*, Aranda editora Técnica Ltda., São Paulo-SP, Brasil, pp.76-89, Junho, 1999.
- [80] WOHLERS, T. "**Rapid Prototyping and Tooling: 1999 Worldwide Progress Report**". Wohlers Associate Inc. pp.221, Colorado – USA, 1999.
- [81] WOHLERS T. "**Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry**", *Worldwide Progress Report*, USA, 1998. (26)
- [82] WOHLERS, T. "**Rapid Prototyping and Tooling Worldwide**", *Seção Técnica*, Congresso Internacional de Novas Tecnologias em Processos de Fabricação e Projeto de Máquinas, Joinville-SC, Brasil, set.1999.

- [83] YAO W. L., LEU M. C., "Analysis of Shell Cracking in Investment Casting With Laser Stereolithography Patterns", *Rapid Prototyping Journal*, vol.5, Issue 1, ISSN 1355-2546, 1999.
- [84] YASSER A. H., NAYFEH J., SUNDARAM R., "Investment Casting Using Stereolithography : Case of Complex Objects", *Department of Industrial Engineering and Management Systems*, University of Central Florida, Orlando, Florida, USA, 1998.

ANEXO A

► ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE ACORDO COM NORMA DIN 1680/PARTE2 [65]

Neste trabalho considerou-se que: para uma peça fundida ser classificada como aceitável seria necessário que as tolerâncias dimensionais estivessem dentro de um intervalo de valores correspondendo a um grau de precisão B ou melhor, descritos na tabela 26, o mesmo ocorrendo com a rugosidade e a porosidade superficiais. Além disso, através de inspeção visual, estabeleceu-se que a peça fundida não poderá conter descontinuidades grosseiras como rachaduras, inclusões, rechupes ou enchimento incompleto.

1. TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS. Na tabela 26 mostrada a seguir, são apresentadas as tolerâncias-normais para peças microfundidas classificadas de acordo com o grau de precisão a ser atingido no processo de microfundição. O grau de precisão **D** aplica-se a dimensões sem tolerâncias determinadas, o grau **C** aplica-se a dimensões com tolerâncias determinadas, o grau **B** aplica-se a dimensões com tolerâncias apertadas e o grau **A** aplica-se a dimensões com tolerâncias bastante apertadas que devem ser selecionadas de acordo com a funcionalidade de uma peça numa dimensão específica. Caso as tolerâncias possíveis de serem atingidas não forem suficientes, deve-se prever sobremetal para usinagem posterior.

Tabela 26 - Tolerância dimensional de peças microfundidas segundo a norma DIN 1680.

TOLERÂNCIAS LINEARES GERAIS							
Faixa de Medida (mm)		Grau de Precisão (mm)				Distância Entre Linhas de Centro (mm)	
de	até	A	B	C	D	A	C
0	6	±0,04	±0,06	±0,08	±0,10	±0,16	±0,25
6	10	±0,05	±0,08	±0,10	±0,12	±0,16	±0,25
10	14	±0,06	±0,10	±0,12	±0,15	±0,16	±0,25
14	18	±0,08	±0,12	±0,15	±0,20	±0,20	±0,32
18	24	±0,10	±0,14	±0,18	±0,25	±0,20	±0,32
24	30	±0,12	±0,17	±0,22	±0,30	±0,20	±0,32
30	40	±0,14	±0,20	±0,26	±0,37	±0,30	±0,50
40	50	±0,17	±0,23	±0,30	±0,44	±0,30	±0,50
50	65	±0,20	±0,27	±0,36	±0,52	±0,45	±0,71
65	80	±0,23	±0,30	±0,42	±0,60	±0,45	±0,71
80	100	±0,27	±0,34	±0,50	±0,68	±0,60	±0,90
100	120	±0,30	±0,38	±0,58	±0,76	±0,60	±0,90
120	140	±0,34	±0,42	±0,66	±0,84	±0,85	±1,15
140	160	±0,38	±0,47	±0,72	±0,92	±0,85	±1,15
160	180	±0,42	±0,52	±0,80	±1,02	±0,85	±1,15
180	200	±0,46	±0,57	±0,88	±1,12	±1,00	±1,80

Convém lembrar que tolerâncias excessivamente apertadas resultarão em custos adicionais de produção, devendo-se evitar especificações de tolerâncias desnecessariamente rígidas.

Ângulos. A tolerância angular depende da configuração da peça. A tolerância mínima para ângulos é de $\pm 30'$.

Raios. Raios e contornos externos ou internos podem sofrer deformações durante o processo de resfriamento da peça. Como orientação pode ser utilizada a tolerância indicada na tabela de distâncias entre linhas de centro (tabela 26).

2. TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS. As tabelas 27 e 28 a seguir são indicativas para peças de seção constante. Conforme a geometria específica da peça poderão ser necessários ajustes mecânicos.

Tabela 27 – Tolerâncias geométricas para peças microfundidas.

RETILINIDADE		CIRCULARIDADE		SOBREMÉTAL PARA USINAGEM		
Dimensão (mm)	Variação Leitura Total	Diâmetro (mm)	Variação Leitura Total	Dimensão (mm)	Sobremetal	
					Usin. Grossa	Usin. Fina
Até 50	0,25	12	0,25	0 à 18	0,50	-
50 à 100	0,50	25	0,40	18 à 50	-	0,3
100 à 150	0,75	38	0,50	50 à 80	0,8	-
150 à 200	1,00	50	0,65	80 à 120	1,0	-

3. PADRÕES VISUAIS PARA PEÇAS MICROFUNDIDAS. O ensaio visual foi um dos primeiros métodos de ensaios não-destrutivos aplicados pelo homem. É certamente o mais utilizados de todos. A inspeção visual tem grande importância na condução de outros ensaios e fornece informações sobre a aparência da superfície, formatos, descontinuidades grosseiras, etc.

Acabamento Superficial. A rugosidade superficial de uma peça microfundida deve estar entre 2,5 e 3,2 μm (Ra). A norma DIN 4769 estabelece alguns padrões de rugosidades para peças microfundidas conforme mostrado na tabela a seguir:

Tabela 28 - Rugosidade superficial de acordo com a norma DIN 4769.

CLASSE	CLA (μ INCH)	R _A (μ m)	R _Z (μ m)	R _T (μ m)
N7	63	1,6	5,9 – 8,0	6,3 – 10
N8	125	3,2	12 – 16	13,0 – 19,5
N9	250	6,3	23 – 32	25 - 38

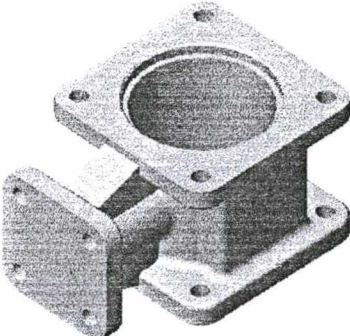
Defeitos em Alto Relevo. Estes serão limitados a dimensões entre 0,40mm e 0,80mm de altura por 3,2mm de diâmetro e não mais que um por polegada quadrada ($6,5\text{cm}^2$). Defeitos menores em todos os tamanhos podem estar presentes ao acaso, mas não em lugares que possam interferir com a funcionalidade da peça como em furos, recartilhados ou marcas de identificação.

Porosidade Superficial. As dimensões máximas aceitáveis para este defeito será limitada à 0,80 e 1,60mm de diâmetro e 0,80mm de profundidade e não mais que um por polegada quadrada ($6,5\text{cm}^2$). Defeitos menores em todos os tamanhos podem ocorrer desde que não interfiram na funcionalidade.

ANEXO B

RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO DAS EXPERIÊNCIAS

Tabela 29 - Relatório de acompanhamento das experiências (continua).

IDENTIFICAÇÃO DA PEÇA / INSERTO :		
CORPO DE VÁLVULA		
Espessura de camada: _____ mm Espessura de parede: _____ mm Tipo de estrutura interna: _____ Espaçamento da estrutura interna: _____ mm Diâmetro drenos: _____ mm Diâmetro respiros: _____ mm Fator de contração da resina SL5170: _____ %		
Massa dos padrões M_{IA} : _____ g	Taxa de vazios R_{VIA} : _____ %	
Informações sobre o processo de microfusão		
Material fundição: _____ Fator de contração: _____ % Material molde cerâmico: _____ Número de camadas molde cerâmico: _____ Tempo de secagem entre camadas: _____		
Parâmetros da Autoclave Temperatura vapor: _____ °C Pressão vapor: _____ bar Tempo: _____ min		Parâmetros Forno Calcinação Temperatura: _____ °C Temp. vazamento do Aço: _____ °C Tempo: _____ min Taxa de oxigênio: _____

ACOMPANHAMENTO DE AMOSTRA MICROFUSÃO

CÓDIGO: _____ CLIENTE: _____ MATERIAL: _____
 SOLICITADO POR: _____ DATA: / / O.F.Nr. _____
 MOTIVO DA AMOSTRA: _____ QUANT. CH. _____ QUANT. PEÇAS: _____

INJEÇÃO / MONTAGEM

COPO: _____ VARETA: _____ PÇS P/ VARETA: _____
 PÇS P/ CH: _____ POSIÇÃO MONTAGEM: _____ AMARRAÇÃO: SIM () NÃO ()
 OBS.: INJEÇÃO : _____
 FERRAMENTA : _____

REVESTIMENTO

TIPO DE LAMA: _____ AREIA FINA A2F: _____ TEMPO DE SECAGEM: _____
 TIPO DE LAMA: _____ CH FINO: _____ TEMPO DE SECAGEM: _____
 TIPO DE LAMA: _____ CH GROSSO: _____ TEMPO DE SECAGEM: _____

Banhos	1° Banho		2° Banho		3° Banho		4° Banho		5° Banho		6° Banho		7° Banho	
	Data	Hora	Data	Hora	Data	Hora	Data	Hora	Data	Hora	Data	Hora	Data	Hora
Zircon.														
Ch Fino														
Ch. Gr.														

OBS.: BANHO BRANCO: _____ DATA: / / HORA: _____
 BANHOS: _____
 QUEBRA: _____

FUNDIÇÃO

TEMP. DE CALCINAÇÃO: _____ °C TEMPO DE CALCINAÇÃO : _____
 TEMP. DE VAZAMENTO: _____ °C POTASSA: SIM () NÃO () TEMPO: _____ min.
 OBS.: DISCO DE CORTE: _____ Cortar: () galho () peça
 JATO : _____

CERA	REVESTIM.		FUNDIÇÃO				ACABAMENTO				TOTAL		
	molde	trinca	penetr	enchim	chupag	inclus	escória	lixa	disco	jato	Amass	aprov	refugo

OBS: _____

CIRCULAR : Eng°. _____ Projeto: _____ Processo: _____

Tabela 29 - Relatório de acompanhamento das experiências (continuação).

**Tabela 30 – Análise dimensional das peças no experimento I
(válvula de segurança e corpo de válvula).**

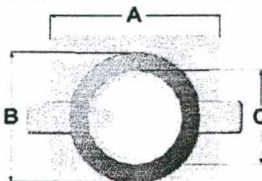
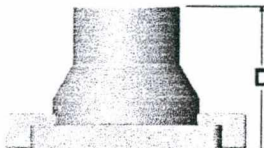
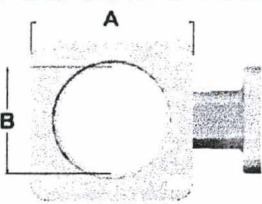
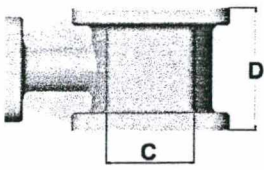
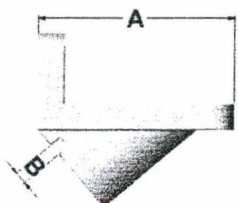
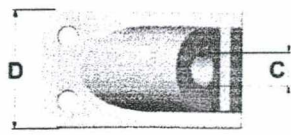
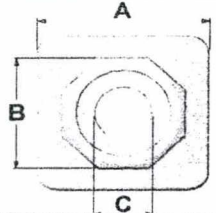
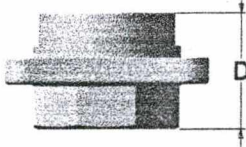
Experimento I									
Válvula de Segurança									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	53,52	41,17	29,88	41,17	52,78	40,60	29,47	40,60
	P 2	53,52	41,17	29,88	41,17	52,78	40,60	29,47	40,60
Média dos Valores Medidos	P 1	53,61	41,30	29,96	41,20	52,45	40,23	29,27	39,28
	P 2	53,74	41,26	29,90	41,26	52,51	40,14	29,19	40,12
Desvio Padrão	P 1	0,05	0,04	0,06	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06
	P 2	0,04	0,04	0,07	0,05	0,04	0,06	0,05	0,08
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,04	± 0,03	± 0,05	± 0,07	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,05
	P 2	± 0,03	± 0,03	± 0,06	± 0,04	± 0,03	± 0,05	± 0,04	± 0,07
Mínimo	P 1	53,56	41,26	29,90	41,12	52,40	40,18	29,22	39,22
	P 2	53,70	41,20	29,86	41,20	52,48	40,10	29,14	40,02
Máximo	P 1	53,64	41,32	30,00	41,24	52,48	40,30	29,34	39,32
	P 2	53,78	41,32	29,98	41,30	52,54	40,22	29,26	40,16
Corpo de Válvula									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,63	30,42	25,35	35,49	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,63	30,42	25,35	35,49	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,84	30,53	25,40	35,57	44,62	29,84	24,68	34,75
	P 2	45,76	30,61	25,46	35,63	44,74	29,76	24,72	34,86
Desvio Padrão	P 1	0,06	0,05	0,04	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04
	P 2	0,08	0,04	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,05	± 0,04	± 0,03	± 0,06	± 0,05	± 0,04	± 0,04	± 0,03
	P 2	± 0,07	± 0,02	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,04	± 0,03	± 0,03
Mínimo	P 1	45,80	30,48	25,36	35,48	44,56	29,80	24,60	34,70
	P 2	45,68	30,58	25,40	35,58	44,68	29,70	24,68	34,82
Máximo	P 1	45,92	30,56	25,44	35,62	44,70	29,86	24,72	34,78
	P 2	45,80	30,66	25,54	35,70	44,82	29,80	24,74	34,88

Tabela 31 – Análise dimensional das peças no experimento I (suporte de eixo e junta de vedação).

Experimento I									
Suporte de Eixo									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	60,84	3,80	9,90	35,49	60,00	3,75	9,75	35,00
	P 2	60,84	3,80	9,90	35,49	60,00	3,75	9,75	35,00
Média	P 1	60,96	3,81	9,92	35,52	59,62	3,70	9,68	34,70
	P 2	60,89	3,86	10,02	35,57	59,71	3,65	9,58	34,66
Desvio Padrão	P 1	0,08	0,03	0,05	0,08	0,09	0,04	0,05	0,05
	P 2	0,07	0,04	0,04	0,07	0,06	0,04	0,04	0,06
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,07	± 0,02	± 0,04	± 0,07	± 0,08	± 0,03	± 0,04	± 0,04
	P 2	± 0,06	± 0,03	± 0,03	± 0,06	± 0,05	± 0,03	± 0,03	± 0,05
Mínimo	P 1	60,90	3,78	9,86	35,42	59,54	3,68	9,62	34,68
	P 2	60,84	3,80	9,98	35,50	59,68	3,60	9,54	34,64
Máximo	P 1	61,08	3,84	9,96	35,54	59,66	3,74	9,72	34,74
	P 2	60,94	3,88	10,04	35,62	59,74	3,68	9,62	34,72
Junta de Vedação									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,63	32,50	15,21	26,36	45,00	32,00	15,00	26,00
	P 2	45,63	32,50	15,21	26,36	45,00	32,00	15,00	26,00
Média	P 1	45,71	32,51	15,33	26,40	44,52	31,64	14,71	25,66
	P 2	45,82	32,60	15,36	26,49	44,62	31,72	14,75	25,79
Desvio Padrão	P 1	0,05	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05
	P 2	0,04	0,04	0,06	0,04	0,05	0,03	0,05	0,06
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,04	± 0,03	± 0,05	± 0,04	± 0,02	± 0,03	± 0,04	± 0,04
	P 2	± 0,03	± 0,03	± 0,05	± 0,03	± 0,04	± 0,02	± 0,04	± 0,05
Mínimo	P 1	45,66	32,46	15,28	26,34	44,48	31,58	14,68	25,60
	P 2	45,78	32,56	15,30	26,46	44,56	31,68	14,70	25,76
Máximo	P 1	45,76	32,54	15,36	26,42	44,54	31,68	14,74	25,70
	P 2	45,84	32,62	15,40	26,52	44,66	31,74	14,78	25,86

**Tabela 32 – Análise dimensional das peças no experimento I
(engrenagem e calota esférica).**

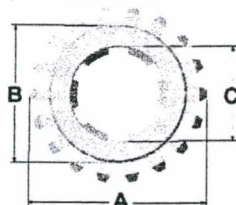

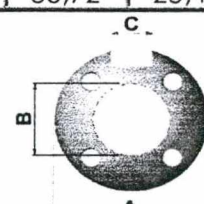

Experimento I									
Engrenagem									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	46,34	36,62	25,35	14,25	45,70	36,12	25,00	14,06
	P 2	46,34	36,62	25,35	14,25	45,70	36,12	25,00	14,06
Média	P 1	46,41	36,80	25,39	14,32	45,42	36,02	24,74	13,93
	P 2	46,38	36,72	25,42	14,30	45,51	35,94	24,70	13,88
Desvio Padrão	P 1	0,05	0,03	0,05	0,06	0,06	0,07	0,04	0,06
	P 2	0,04	0,03	0,04	0,04	0,07	0,06	0,04	0,07
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,04	± 0,02	± 0,04	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,03	± 0,05
	P 2	± 0,03	± 0,02	± 0,03	± 0,03	± 0,06	± 0,05	± 0,03	± 0,06
Mínimo	P 1	46,36	36,74	25,34	14,26	45,38	35,94	24,70	13,88
	P 2	46,32	36,68	25,38	14,26	45,46	35,88	24,66	13,80
Máximo	P 1	45,44	36,82	25,42	14,36	45,48	36,06	24,78	14,00
	P 2	46,40	36,72	25,46	14,34	45,60	35,98	24,72	13,98
Calota Esférica									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	60,84	30,42	16,22	26,34	60,00	30,00	16,00	26,00
	P 2	60,84	30,42	16,22	26,34	60,00	30,00	16,00	26,00
Média	P 1	60,89	30,50	16,30	26,38	59,58	29,73	15,75	25,88
	P 2	60,95	30,59	16,26	26,42	59,64	29,84	15,86	25,81
Desvio Padrão	P 1	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04
	P 2	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,03	± 0,03	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,04	± 0,03	± 0,03
	P 2	± 0,02	± 0,04	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,04	± 0,04
Mínimo	P 1	60,86	30,46	16,22	26,34	59,54	29,70	15,70	25,86
	P 2	60,90	30,52	16,20	26,38	59,60	29,80	15,82	25,76
Máximo	P 1	60,92	30,52	16,32	26,40	59,62	29,78	15,78	25,92
	P 2	60,98	30,62	16,30	26,44	59,68	29,86	15,92	25,84

Tabela 33 – Análise dimensional para as peças construídas no experimento III (continua).

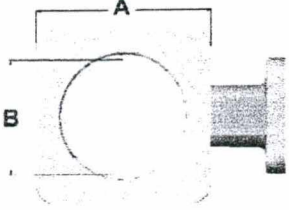
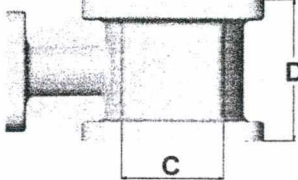
Experimento III									
Corpo de Válvula									
• Variável Estudada: Espessura de Parede do Padrão QC = 0.30 mm									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,90	30,63	25,51	35,58	45,13	29,90	25,07	34,92
	P 2	45,81	30,57	25,62	35,63	45,08	29,87	25,02	35,06
Desvio Padrão	P 1	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04
	P 2	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06	0,04
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,04	± 0,03
	P 2	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,03	± 0,02	± 0,03	± 0,05	± 0,03
Mínimo	P 1	45,86	30,58	25,44	35,56	45,08	29,88	25,00	34,90
	P 2	45,78	30,54	25,56	35,60	45,04	29,84	24,96	35,00
Máximo	P 1	45,92	30,64	25,54	35,60	45,14	29,92	25,10	34,96
	P 2	45,82	30,60	25,64	35,68	45,10	29,90	25,06	35,08
• Variável Estudada: Espessura de Parede do Padrão QC = 0.45 mm									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,77	30,50	25,44	35,62	45,08	29,91	24,87	35,05
	P 2	45,81	30,54	25,50	35,69	45,12	30,03	24,90	34,96
Desvio Padrão	P 1	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04
	P 2	0,04	0,05	0,03	0,05	0,03	0,05	0,05	0,03
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,04	± 0,04	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,03	± 0,02	± 0,03
	P 2	± 0,03	± 0,04	± 0,02	± 0,04	± 0,02	± 0,04	± 0,04	± 0,02
Mínimo	P 1	45,70	30,46	25,40	35,60	45,04	29,88	24,84	35,00
	P 2	45,76	30,50	25,46	35,62	45,08	29,98	24,86	34,92
Máximo	P 1	45,80	30,52	25,46	35,66	45,12	29,94	24,90	35,08
	P 2	45,86	30,60	25,52	35,72	45,16	30,10	24,96	34,98

Tabela 33 – Análise dimensional para as peças construídas no experimento III (continuação).

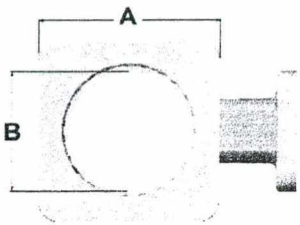
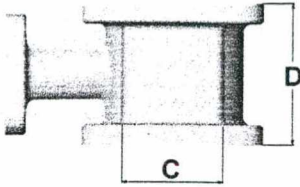
Experimento III									
Corpo de Válvula									
		• Variável Estudada: Espessura de Parede do Padrão QC = 0.60 mm							
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,80	30,52	25,43	35,60	45,04	29,88	24,98	34,96
	P 2	45,85	30,49	25,51	35,54	44,95	29,88	25,07	34,88
Desvio Padrão	P 1	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,05
	P 2	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,03	± 0,04	± 0,03	± 0,02	± 0,02	± 0,04	± 0,03	± 0,04
	P 2	± 0,04	± 0,03	± 0,03	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,02	± 0,04
Mínimo	P 1	45,76	30,48	25,40	35,54	45,00	29,84	24,94	34,90
	P 2	45,80	30,46	25,48	35,50	44,92	29,86	25,04	34,86
Máximo	P 1	45,82	30,58	25,48	35,62	45,06	29,94	25,02	35,00
	P 2	45,88	30,52	25,54	35,60	44,98	29,94	26,10	34,94
• Variável Estudada: Tipo de Estrutura Interna = Triangular									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,87	30,49	25,43	35,66	45,11	30,02	24,89	34,92
	P 2	45,76	30,55	25,51	35,53	45,08	29,91	24,95	35,02
Desvio Padrão	P 1	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03
	P 2	0,05	0,04	0,06	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,03	± 0,02	± 0,02	± 0,03	± 0,04	± 0,05	± 0,03	± 0,02
	P 2	± 0,04	± 0,03	± 0,05	± 0,02	± 0,04	± 0,04	± 0,04	± 0,03
Mínimo	P 1	45,84	30,46	25,40	35,60	45,06	29,96	24,86	34,90
	P 2	45,70	30,50	25,42	35,50	45,00	30,88	24,90	34,98
Máximo	P 1	45,90	30,52	25,46	35,68	45,14	30,04	24,92	34,96
	P 2	45,80	30,58	25,54	35,56	45,10	29,94	25,00	35,04

Tabela 33 – Análise dimensional para as peças construídas no experimento III (continuação).

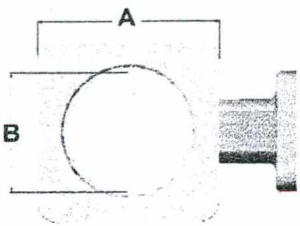
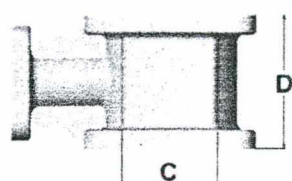
Experimento III									
Corpo de Válvula									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,77	30,53	25,49	35,60	44,99	29,93	24,94	35,01
	P 2	45,83	30,56	25,50	35,61	44,89	29,98	24,87	35,09
Desvio Padrão	P 1	0,05	0,04	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,05
	P 2	0,06	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,07
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,04	± 0,03	± 0,06	± 0,05	± 0,04	± 0,03	± 0,02	± 0,04
	P 2	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,03	± 0,06
Mínimo	P 1	45,70	30,50	25,40	35,52	44,92	29,88	24,90	34,96
	P 2	45,76	30,50	25,42	35,56	44,86	29,90	24,82	34,98
Máximo	P 1	45,82	30,58	25,54	35,64	45,02	29,98	24,96	35,04
	P 2	45,90	30,60	25,54	35,66	44,96	30,02	24,92	35,12
• Variável Estudada		Tipo de Estrutura Interna = Hexagonal							
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,86	30,57	25,44	35,66	44,94	29,89	24,93	34,95
	P 2	45,82	30,49	25,42	35,62	45,07	29,94	24,92	34,90
Desvio Padrão	P 1	0,05	0,06	0,05	0,06	0,03	0,07	0,05	0,04
	P 2	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05	0,07	0,03	0,06
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,04	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,02	± 0,06	± 0,04	± 0,03
	P 2	± 0,03	± 0,04	± 0,05	± 0,06	± 0,04	± 0,06	± 0,02	± 0,05
Mínimo	P 1	45,80	30,50	25,40	35,60	44,92	29,80	24,88	34,90
	P 2	45,76	30,44	25,36	35,54	44,96	29,86	24,90	34,86
Máximo	P 1	45,94	30,62	25,52	35,72	44,96	29,98	24,98	35,00
	P 2	45,84	30,54	25,50	35,70	45,12	30,00	24,96	34,98

Tabela 33 – Análise dimensional para as peças construídas no experimento III (continuação).

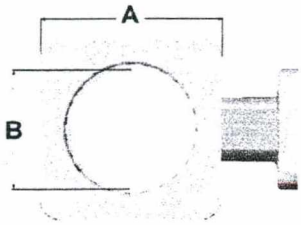
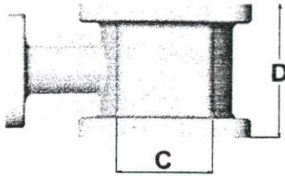
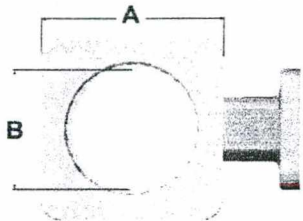
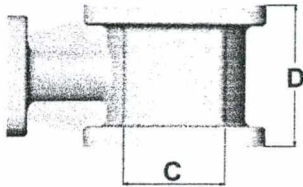
Experimento III									
Corpo de Válvula									
	• Variável Estudada: Espaço da Estrutura Interna = 1.5 mm								
Análise Estatística	Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida				
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,83	30,52	25,45	35,50	45,05	30,02	24,94	35,04
	P 2	45,86	30,52	25,44	35,54	45,11	29,99	24,89	35,00
Desvio Padrão	P 1	0,08	0,07	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,06
	P 2	0,07	0,06	0,04	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,07	± 0,06	± 0,04	± 0,04	± 0,05	± 0,04	± 0,03	± 0,05
	P 2	± 0,046	± 0,05	± 0,03	± 0,05	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,03
Mínimo	P 1	45,68	30,40	25,40	35,42	44,90	29,94	24,90	34,96
	P 2	45,74	30,48	25,42	35,46	45,00	29,92	24,86	34,96
Máximo	P 1	45,86	30,56	25,52	35,58	45,08	30,06	25,00	35,12
	P 2	45,90	30,60	25,48	35,60	45,16	30,02	24,94	35,04
• Variável Estudada: Espaço da Estrutura Interna = 3.125 mm									
Análise Estatística	Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida				
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,81	30,50	25,51	35,59	45,09	29,94	25,02	34,95
	P 2	45,76	30,56	25,46	35,62	45,07	29,98	24,95	34,93
Desvio Padrão	P 1	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,04
	P 2	0,07	0,05	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,05
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,03
	P 2	± 0,06	± 0,04	± 0,06	± 0,06	± 0,05	± 0,05	± 0,03	± 0,04
Mínimo	P 1	45,76	30,46	25,40	35,46	44,96	29,88	24,88	34,90
	P 2	45,64	30,50	25,36	35,50	44,98	29,94	24,90	34,88
Máximo	P 1	45,90	30,62	25,58	35,62	45,16	30,02	25,08	34,98
	P 2	45,82	30,62	25,50	35,70	45,14	30,08	25,00	34,98

Tabela 33 – Análise dimensional para as peças construídas no experimento III (continuação).

Experimento III									
Corpo de Válvula									
Análise Estatística		Medições no Padrão QuickCast™				Medições na Peça Fundida			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Valor Nominal (Desejado)	P 1	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
	P 2	45,72	30,48	25,40	35,56	45,00	30,00	25,00	35,00
Média	P 1	45,84	30,53	25,51	35,58	45,05	30,02	24,94	35,04
	P 2	45,81	30,54	25,46	35,63	45,11	29,91	24,87	34,99
Desvio Padrão	P 1	0,09	0,07	0,07	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05
	P 2	0,08	0,08	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06
Intervalo de Confiança	P 1	± 0,08	± 0,06	± 0,06	± 0,03	± 0,04	± 0,04	± 0,03	± 0,04
	P 2	± 0,07	± 0,07	± 0,04	± 0,05	± 0,03	± 0,05	± 0,04	± 0,05
Mínimo	P 1	45,78	30,45	25,44	35,54	44,98	29,98	24,90	34,96
	P 2	45,74	30,40	25,42	35,58	45,02	29,88	24,82	34,88
Máximo	P 1	45,92	30,56	25,56	35,64	45,12	30,12	25,00	35,10
	P 2	45,94	30,58	25,52	35,71	45,16	30,06	24,94	35,04

ANEXO C

DIRETRIZES OU RECOMENDAÇÕES DE PROJETO PARA FABRICAÇÃO DOS PADRÕES QUICKCAST PARA MICROFUSÃO

Um dos objetivos desta pesquisa foi reunir informações acerca dos procedimentos e diretrizes de projeto dos padrões QuickCast™ para microfusão buscando melhorar a qualidade e o rendimento de peças fundidas. As recomendações oferecidas a seguir baseiam-se na experiência adquirida nos ensaios e experimentos realizados, bem como a partir de sugestões e regras de projeto fornecidas pelas fundições inicialmente envolvidas com o desenvolvimento do estilo QuickCast™ :

PREPARAÇÃO DO ARQUIVO CAD

1. Em geral, apesar de que os padrões QuickCast permitam a geração de paredes tão finas quanto 0.4 mm, a espessura de parede mínima confiável é de 1.5 mm. Quando for imperativo utilizar espessuras de parede inferiores a 1.5 mm recomenda-se consultar a fundição.
2. As peças devem ser orientadas para maximizar a definição de *features* no plano XY. Isto minimizará os efeitos de degraus em superfícies inclinadas e os efeitos de sobrecura e erros de quantização em qualquer superfície inferior da casca na direção Z.
3. Cantos interiores de um padrão devem ser obrigatoriamente arredondados para reduzir a concentração de tensões na peça fundida. Similarmente, cantos exteriores precisam ou ser chanfrados ou arredondados para um melhor fluxo do metal e para evitar cascas muito finas. Se o usuário de um sistema CAD não puder executar estas funções, os cantos vivos externos do padrão QuickCast™ devem ser suavizados com uma lixa ou lima. Cera para fundição também pode ser aplicada como *fillets* em cantos internos.
4. Se os padrões QuickCast™ devem ser montados em múltiplas peças é importante que os drenos e respiros sobreposicionados sejam reposicionados ao longo de bordas comuns para aliviar qualquer diferença de pressão interna que possa ocorrer durante a queima. Se estes passos não forem considerados, a formação de pressão durante a eliminação do padrão pode causar a quebra da casca.

5. A coordenação com a fundição permitirá ao usuário incluir valores mais apropriados para a compensação da contração do metal durante o processo de preparação da peça.

PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DOS PADRÕES

1. Em geral, quando a geometria do padrão possuir muitas superfícies planas ou verticais, espessuras de camada de 0.15 mm devem ser utilizadas para construção dos padrões, entretanto, quando a geometria possuir regiões inclinadas ou arredondadas, recomenda-se o uso de espessuras de camada menores (por exemplo, 0.10 mm para SLA250 e SL5170).
2. As formas hexagonais e quadradas, para a estrutura interna dos padrões, foram as que apresentaram melhores resultados em termos de eficiência na drenagem e menor resistência ao colapso durante a fase de queima.
3. Dependendo da geometria da peça, espaçamentos da estrutura interna da ordem de 5 a 6 mm podem ser utilizados visando melhorar a drenagem dos padrões. Entretanto, este parâmetro deve ser analisado conjuntamente com a forma da malha e a altura de transição desta, bem como a espessura de parede do padrão visando a construção de superfícies suaves, sem ondulações.
4. Espessuras de parede do padrão da ordem de três vezes a espessura de camada ($3 \times 0.15 = 0.45 \text{ mm}$) eliminaram quase por completo as ondulações nas superfícies superior e laterais dos padrões, mesmo com largos espaçamentos da estrutura interna (da ordem de 5.0 mm), porém esta configuração gera níveis de tensões muito altos, levando, muitas vezes, à ruptura da casca cerâmica. Uma indicação prática seria usar espessuras de parede maiores (por exemplo de 0.45mm) para peças de grande volume e com estrutura interna largamente espaçada e espessuras de parede menores (0.30 mm, por exemplo) para peças pequenas e com estrutura interna menos espaçada.
5. Para a resina SL5170, drenos e respiros com diâmetros menores que 5 mm e 2 mm, respectivamente, devem ser evitados. A quantidade e posicionamento dependem da geometria do padrão e devem ser colocados, preferencialmente, próximos de paredes laterais e espaçados cerca de 50mm um do outro.

DRENAGEM DOS PADRÕES

1. Os melhores resultados foram obtidos com padrões que foram drenados e pós-curados em ambientes de baixa umidade dentro de 8 horas após o término da construção.
2. Para encurtar o tempo de drenagem, deve-se posicionar a dimensão mais longa da peça verticalmente. Isto aumenta a pressão gravitacional e acelera a drenagem da resina.
3. A temperatura adequada para drenagem das resinas SL 5170 e SL 5180 é entre 28 e 35°C. Não é recomendável a construção de peças em temperatura acima de 40 °C, pois, apesar de a viscosidade da resina diminuir com o aumento da temperatura, sua resistência também diminui, podendo levar a distorções no padrão.
4. Uma centrífuga de baixa velocidade ou bomba de vácuo pode acelerar a drenagem. Nunca deve-se usar ar comprimido para ajudar na drenagem dos padrões, pois este ar geralmente não é seco. A água contida no ar comprimido pode amolecer e distorcer o padrão.
5. Expondo peças verdes ou resina líquida por muitas horas em radiação UV ou lâmpadas fluorescentes, especialmente enquanto existir resina no interior do padrão, causará a cura da resina parcialmente curada. Isto pode ocasionar superfícies grudentas e drenagem inadequada. Assim, uma boa prática é drenar as peças ainda dentro da SLA, limpando com um papel-toalha e pós-curando-o o mais depressa possível.

REMOÇÃO DOS SUPORTES

1. Deve-se tomar cuidados especiais durante a fase de remoção dos suportes para não ocasionar perfurações nas superfícies inferiores do padrão.
2. A remoção dos suportes pode ser facilitada com o uso de uma faca quente.

CUIDADOS COM A LIMPEZA DOS PADRÕES QUICKCAST™

1. Superfícies externas dos padrões devem simplesmente ser secas com papel-toalha absorvente. O solvente álcool isopropílico ou RG-IPA, contém menos de 1% de água, podendo ser usado para limpar padrões QuickCast™ contanto que não seja permitido que nenhum solvente entre dentro do padrão. Para prevenir distorções, deve-se

- eliminar qualquer excesso de solvente da superfície externa da peça usando, imediatamente, nitrogênio seco ou ar comprimido seco para acelerar o processo de evaporação.
2. Álcool isopropílico e outros solventes inibem a fotocura da resina líquida. Entretanto, as superfícies externas do padrão podem ser limpas com algum destes solventes e então secadas antes de serem colocadas no forno de radiação UV para pós-cura final.
 3. Se os padrões QuickCast™ entrarem em contato com água ou solventes contendo água, eles amolecerão e sofrerão distorção. Devido à sua grande taxa superfície/volume, a exposição dos padrões à alta umidade por apenas poucas horas também poderá causar amolecimento e distorções. O uso de desumidificadores e dessecantes tanto na SLA quanto nas áreas de acabamento é bastante recomendado.

ETAPA DE PÓS-CURA

1. Depois de serem limpos, os padrões devem ser pós-curados o mais rápido possível. A alta umidade pode inibir a cura da superfície deixando-a pegajosa. A exposição dos padrões “verdes” à ambientes úmidos (com umidade relativa do ar acima de 50%) pode causar um amolecimento do padrão e, no pior dos casos, distorções permanentes do padrão.
2. O tempo de pós-cura depende da geometria da peça. Entretanto, padrões QuickCast™ geralmente curam 25% mais rápido que peças sólidas.

PREPARAÇÃO DOS PADRÕES PARA A ETAPA DE RECOBRIMENTO

1. Se necessário, superfícies podem ser jateadas, lixadas e polidas, cuidando, entretanto, para que a areia proveniente do jato não atravesse a casca do padrão.
2. Todos os furos na superfície do padrão devem ser selados. Isto pode ser feito tanto com cera de fundição como utilizando colas adesivas à base de epóxi ou mesmo com a própria resina epóxi sendo posteriormente curada. Os melhores resultados foram obtido com o uso de colas líquidas a base de epóxi.

3. Padrões QuickCast™ não devem ser imersos em nenhum líquido visando identificar eventual existência de furos na superfície externa dos padrões.
4. Após todos os furos terem sido cobertos, deve-se construir um pequeno furo na face do canal de alimentação de metal que será colada à árvore de cera, o qual será coberto pela cera de fundição quando da operação de montagem dos padrões na árvore. Este furo possibilitará a equalização das pressões interna e externa do padrão, no interior da autoclave, quando a cera derreter. Se este passo não for considerado, a formação de pressão durante a eliminação do padrão pode causar a quebra da casca cerâmica.
5. Um método eficiente para localizar furos na superfície de um padrão QuickCast™ utiliza um detector de vazamentos. Trata-se de uma bomba de vácuo que pode confirmar se existem vazamentos no padrão se a pressão indicada no medidor varia quando o bombeamento é parado.